

К.Т. Искаков, А.Т. Кусаинова, Д.М. Бешеев,
М.К. Турарова, А.М. Жансеитова

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И
РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ДИАГНОСТИКЕ

МОНОГРАФИЯ

**Министерство образования и науки
Республики Казахстан**

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

**ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ:
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ДИАГНОСТИКЕ**

**Астана
2025**

УДК 625.7
ББК 39.311-044
Г 36

Рекомендована к изданию Ученым Советом Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева, протокол №5 от «28» октября 2025 года

*Рецензенты: д.т.н., профессор Маткаримов Б.Т.
д.ф. - м.н, профессор Рысбайұлы Б.
к.т.н., профессор Султанов М.А.*

Г 36 Георадарные исследования дорожной одежды: вычислительные технологии и рекомендации по диагностике: монография./ К.Т. Искаков, А.Т. Кусаинова, Д.М. Бешеев, М.К. Турарова, А.М. Жансеитова – Астана: ИП «Булатов А.Ж.», 2025. – 151 с.

ISBN 978-601-391-014-7

В данном научном издании рассматриваются современные методы и алгоритмы георадиолокационных исследований дорожных одежд с использованием георадара серии «ОКО». Основное внимание уделено разработке алгоритмов цифровой обработки сигналов (вейвлет-преобразование, преобразование Гильберта, цифровая фильтрация) и созданию программного обеспечения для интерпретации радарограмм и определения геоэлектрического разреза дорожной конструкции на основе инженерно-технических методов и математического моделирования. Сформирована база данных априорной информации о состоянии автомобильных трасс, обеспечивающая систематизацию экспериментальных материалов и автоматизацию анализа. Практическая значимость работы заключается в проведении экспериментальных и лабораторных исследований совместно с РГП на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов». Издание предназначено для научных работников, инженеров дорожной отрасли, программистов, магистрантов и докторантов, специализирующихся в области вычислительной техники, геофизики и неразрушающего контроля. Работа соответствует государственным приоритетам научно-технического развития Республики Казахстан: информационные, коммуникационные и космические технологии; по подприоритету — высокопроизводительные вычислительные технологии, геоинформационные технологии и системы.

УДК 625.7
ББК 39.311-044

ISBN 978-601-391-014-7

© Искаков К.Т. и другие, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СВОЙСТВА И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРАСС.....	8
1.1. Основные характеристики конструктивных элементов дорожной одежды.....	8
1.2. Классификация элементов дорожной конструкции.....	10
1.3. Аномалии дорожного покрытия.....	17
2 АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ.....	26
2.1 Общие подходы к цифровой обработке сигналов.....	26
2.2 Алгоритм вейвлет-преобразования зондирующих георадиолокационных сигналов.....	27
2.3 Алгоритм преобразования Гильберта зондирующих сигналов.....	31
2.4 Алгоритм очистки георадиолокационного сигнала цифровыми фильтрами.....	33
2.5 Примеры применения фильтрации на реальных данных..	44
3 МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ.....	49
3.1 Обзор и анализ существующих методов радиолокационных исследований для реальных георадарных данных.....	49
3.2 Дискретный алгоритм интерпретации для вертикально неоднородных сред.....	58
3.3 Алгоритм определения источника в цифровом формате георадиолокационного прибора для различных антенных блоков.....	68
3.4 Определение амплитудно-частотных характеристик георадиолокационных сигналов.....	75
4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ИНСТРУКЦИИ ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	80

4.1	Планирование обследований дорожных конструкций с применением георадара «ОКО-3».....	80
4.2	Техническое обеспечение обследований и параметры зондирования.....	83
4.3	Алгоритм обработки и выделения слоев дорожной одежды в программном комплексе CartScan.....	86
4.4.	Проектирование базы данных GPR-исследований.....	101
	Список литературы	117
	Приложение А Экспериментальные исследования с использованием георадара «ОКО-2» и примеры интерпретированных радарограмм.....	123
	Приложение Б Схема базы данных.....	145

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие транспортной инфраструктуры напрямую связано с обеспечением надежности и долговечности автомобильных дорог. Ключевым условием эффективной эксплуатации дорожных конструкций является своевременная диагностика их состояния, выявление дефектов и прогнозирование дальнейшего ресурса. Традиционные методы обследования зачастую не позволяют получить достоверную информацию о внутренних слоях дорожной одежды без нарушения её целостности. В этой связи всё большее значение приобретают неразрушающие методы контроля, среди которых особое место занимает георадиолокация. Использование георадара серии «ОКО» открывает новые возможности для изучения подповерхностной структуры дорожных конструкций, фиксации аномалий и оценки эксплуатационных характеристик.

Цель настоящей работы заключается в разработке алгоритмов цифровой обработки георадарных данных и создании вычислительной системы для интерпретации радарограмм при обследовании дорожных одежд. Для её достижения предполагается комплексное решение ряда научных и прикладных задач. Среди них – исследование параметров конструктивных элементов дорожных одежд и анализ аномалий покрытия в соответствии с действующими стандартами; сбор, систематизация и классификация экспериментальных данных; определение амплитудно-частотных характеристик сигналов и изучение технических параметров антенных блоков георадара «ОКО». Отдельное внимание уделено анализу и модернизации существующих методов интерпретации реальных георадарных данных, включая разработку алгоритмов вейвлет-преобразования, преобразования Гильберта и цифровой фильтрации.

В ходе работы осуществляется построение алгоритмов решения прямых и обратных задач подповерхностной радиолокации, разработка методов цифровой очистки сигналов и создание программ визуализации интерпретированных радарограмм. Дополнительно формируется база данных экспериментальных исследований, систематизированная в соответствии с классификацией дорожных конструкций, и разрабатывается программное обеспечение для интерпретации

результатов подповерхностных зондирований. Структура монографии отражает логику поставленных задач и построена по принципу перехода от анализа свойств дорожных конструкций к разработке и внедрению алгоритмов обработки и интерпретации.

В первой главе подробно представлены основные характеристики и классификация элементов дорожной одежды, включая конструктивные особенности покрытий, оснований и подстилающих слоев. Рассмотрены параметры и состояние элементов дорожных конструкций в соответствии с действующими стандартами, а также проведен анализ типичных аномалий покрытия. Особое внимание уделено описанию дефектов различного генезиса – трещин, расслоений, пустот, зон повышенной влажности – и их влиянию на эксплуатационные характеристики автомобильных трасс. Материалы главы формируют основу для последующей интерпретации георадарных данных и сопоставления расчетных моделей с результатами полевых обследований.

Вторая глава посвящена методам цифровой обработки георадарных сигналов. В ней детально рассмотрены алгоритмы вейвлет-преобразования для выделения информативных компонент отраженных сигналов, алгоритм преобразования Гильберта для анализа огибающей и фазовых характеристик, а также алгоритмы цифровой фильтрации, направленные на очистку сигналов от шумов и паразитных составляющих. Приведены примеры применения разработанных методов к реальным георадарным данным, что подтверждает их эффективность при решении задач диагностики дорожных конструкций.

В третьей главе рассматриваются методы интерпретации георадарных данных. Проведен обзор и анализ существующих алгоритмов радиолокационных исследований для реальных измерений. Представлены дискретные и оптимизационные подходы к решению прямых и обратных задач подповерхностной радиолокации для слоистых и кусочно-непрерывных сред. Описаны методы определения амплитудно-частотных характеристик георадарных сигналов, разработан алгоритм идентификации источника в цифровом формате для различных антенных блоков георадара «ОКО». В главе также приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность предложенных методов и алгоритмов.

Четвертая глава включает методические рекомендации и инструкции по практическому применению георадарных технологий при обследовании дорожных конструкций. Здесь представлены подходы к планированию обследований, выбору оборудования и параметров зондирования, описаны процедуры проведения измерений, первичной цифровой обработки и коррекции данных. Отдельный раздел посвящен созданию и наполнению базы данных экспериментальных исследований дорожной одежды, что обеспечивает систематизацию полученных материалов и возможность автоматизированной обработки. Завершают главу практические рекомендации для инженерных организаций дорожной отрасли по использованию результатов георадарных обследований.

Приложение А. Экспериментальные исследования с использованием георадара «ОКО-2». В данном приложении представлены результаты полевых экспериментов, выполненных с применением георадара серии «ОКО-2». Приведены параметры зондирования, технические характеристики антенных блоков, схемы проведения измерений и примеры исходных радарограмм для различных типов дорожной одежды. Материалы этого приложения позволяют проследить особенности формирования отраженных сигналов и дают возможность сопоставить экспериментальные данные с результатами численного моделирования.

Приложение Б. Схема базы данных. В приложении содержится инфологическая схема базы данных, созданной для хранения, систематизации и дальнейшей обработки экспериментальных материалов георадарных обследований. Отражены ключевые сущности и их взаимосвязи: параметры дорожной одежды, условия проведения измерений, технические характеристики приборов, результаты цифровой обработки и интерпретации. Такая структура базы данных обеспечивает возможность дальнейшего расширения, автоматизации анализа и формирования обобщённых рекомендаций по диагностике дорожных конструкций.

1 СВОЙСТВА И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТРАСС

1.1. Основные характеристики конструктивных элементов дорожной одежды

Автомобильные дороги Республики Казахстан подразделяются на автомобильные дороги общего пользования, хозяйственные автомобильные дороги, а также на улично-дорожную сеть населённых пунктов. Такое деление закреплено в Законе Республики Казахстан «Об автомобильных дорогах» от 17 июля 2001 года [1], где подчёркивается особая роль автомобильных дорог как неотъемлемой части транспортной инфраструктуры страны. В законе даётся и базовое определение дорожной одежды как многослойной конструкции в пределах проезжей части, воспринимающей нагрузку от автотранспортных средств и передающей её на грунт земляного полотна.

Задачи проектирования и эксплуатации дорог регулируются широким спектром нормативных и правовых документов: Законом Республики Казахстан «Об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности» [2], техническими регламентами, строительными нормами и национальными стандартами. Среди ключевых можно выделить: СН РК 3.03-01-2013 «Автомобильные дороги», Технический регламент «Требования безопасности при проектировании автомобильных дорог» (утверждён постановлением Правительства Республики Казахстан от 31 марта 2008 года № 307), строительные нормы СН РК 3.03-04-2014, своды правил СП РК 3.03-103-2014 «Проектирование жёстких дорожных одежд», СП РК 3.03-104-2014 «Проектирование нежёстких дорожных одежд», а также стандарт СТ РК 2068-2010 «Дороги автомобильные общего пользования» [3–6]. Эти документы определяют базовые требования к составу, прочностным характеристикам, условиям эксплуатации и долговечности дорожных одежд.

Согласно документу Р РК 218-149-2018 для исследования, сбора и анализа информации о параметрах и состоянии элементов

дорожной одежды автомобильных трасс требуется использовать следующие термины [1]:

Земляное полотно - конструктивный элемент, служащий основанием для размещения дорожной одежды, а также технических средств организации дорожного движения и обустройства автомобильной дороги [1].

Конструктивный слой - каждый слой дорожной одежды, состоящий из однородных материалов и отличающийся от соседних слоев видом материалов, его прочностью и составом. Учитывается при расчете прочности дорожной одежды [1].

Покрытие дорожное - Одно- или многослойная верхняя часть дорожной одежды, устраиваемая на дорожном основании, непосредственно воспринимающая нагрузки от транспортных средств и предназначенная для обеспечения заданных эксплуатационных требований и защиты дорожного основания от воздействия атмосферных факторов [1].

Основание дорожное - нижний несущий слой дорожной одежды, воспринимающий нагрузки от транспортных средств совместно с покрытием и предназначенный для ее распределения на дополнительные слои или непосредственно на грунт земляного полотна.

В соответствии с требованиями СП РК 3.03-101-2013 (ред. 2019 г.) минимальные толщины слоёв в уплотнённом состоянии должны соответствовать нормативам. Например, для крупнозернистого асфальтобетона — не менее 6 см, для мелкозернистого — не менее 4 см, для ЩМА — не менее 3 см. Асфальтобетонные смеси должны укладываться с коэффициентом уплотнения не ниже 0,99 для типов А и Б и не ниже 0,98 для смесей типов В, Г, Д, а также пористых разновидностей [5–6]. Для щебёночных и гравийных оснований толщина слоя варьируется от 8 до 15 см в зависимости от вида вяжущего и условий укладки; для песчано-гравийных смесей на грунтовом основании — не менее 15 см. При устройстве слоёв на глинистых и суглинистых грунтах обязательно применяется разделительная прослойка толщиной не менее 10 см.

Дополнительные дренирующие и морозозащитные слои включаются в конструкцию в случае неблагоприятных гидрогеологических и климатических условий. Их толщина определяется расчётом, но, как правило, составляет 10–20 см. Эти

слои выполняют ключевую функцию защиты основания от переувлажнения и морозного пучения, что особенно важно для дорожно-климатических зон с глубокой сезонной мерзлотой.

Земляное полотно служит несущей частью всей конструкции. Качество его уплотнения должно обеспечивать коэффициент не менее 0,98. Жёсткостные характеристики земляного полотна и дорожной одежды определяются по стандартам СТ РК 1293-2019 и СТ РК 1377-2015, регламентирующим применение статических и динамических методов измерения модуля упругости. Дополнительно используется Р РК 218-152-2018, где установлены рекомендации по применению мобильных дефлектометров (FWD) для оценки эксплуатационного состояния дорог.

По данным Национального центра качества дорожно-строительных активов (НЦКДА), средняя суммарная толщина дорожной одежды на республиканских трассах составляет 58–72 см. Общий модуль упругости конструкции нежёсткого типа находится в диапазоне 180–260 МПа, что соответствует нормативным требованиям для дорог I–II категорий. При этом наиболее часто выявляемыми дефектами являются колеи глубиной до 25 мм, сеточные и продольные трещины, а также локальные выбоины. Современные проекты дорожных конструкций в Казахстане всё чаще включают щебёночно-мастичные асфальтобетоны и полимербитумные вяжущие (БНД 60/90, ПБВ), что позволяет повысить трещиностойкость и увеличить межремонтные сроки службы дорожного покрытия.

1.2. Классификация элементов дорожной конструкции

Классификация по типу дорожных одежд СНГ (ГОСТ Р 59120—2021) [7]. Классификация в зависимости от капитальности, характеризующей работоспособность, дорожные одежды представлена на рисунке 1.1.

В соответствии с ГОСТ Р 59120—2021 дорожные одежды подразделяются на несколько типов по степени капитальности, которая отражает уровень работоспособности конструкции, срок её службы и соответствие условиям эксплуатации.

Капитальные	одежды.	Характеризуются
усовершенствованным	покрытием	и наибольшей

работоспособностью. Они рассчитаны на движение по автомобильным дорогам высоких категорий с интенсивным транспортным потоком и обеспечивают длительный срок службы.

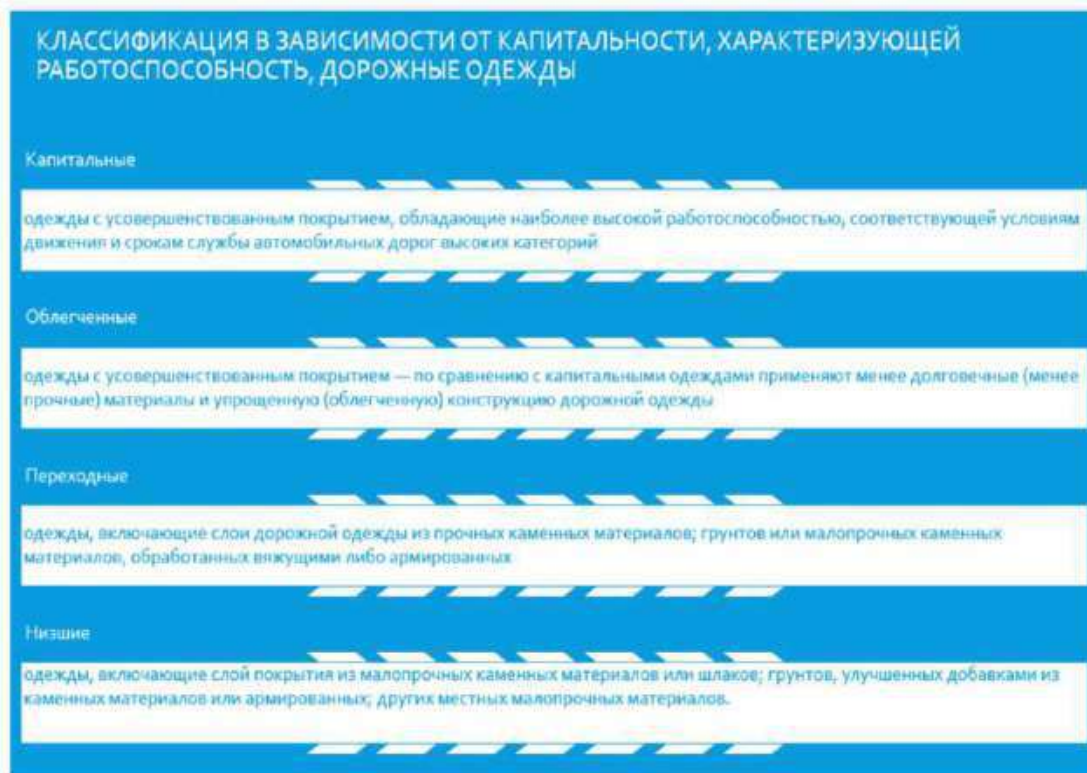


Рисунок 1.1 - Классификация в зависимости от капитальности, характеризующей работоспособность, дорожные одежды

Облегчённые одежды. Также имеют усовершенствованное покрытие, однако в их конструкции используются менее долговечные материалы и более упрощённые технологические решения. Эти конструкции применяются, как правило, на дорогах с меньшей интенсивностью движения и меньшим сроком межремонтной службы.

Переходные одежды. Включают слои из прочных каменных материалов или грунтов, обработанных вяжущими, либо армированных конструкций. Их эксплуатационные показатели занимают промежуточное положение между облегченными и капитальными типами.

Низшие одежды. Формируются с применением малопрочных каменных материалов, шлаков или грунтов, улучшенных местными добавками, а также армированных слоёв из слабых минеральных материалов. Применяются преимущественно на дорогах низких

категорий или временных трассах с ограниченными сроками службы.

Таким образом, классификация по капитальности позволяет систематизировать типы дорожных одежд по уровню их прочности и долговечности. Капитальные конструкции ориентированы на магистральные дороги и обеспечивают высокую эксплуатационную надёжность, тогда как облегчённые, переходные и низшие применяются в условиях ограниченного финансирования, меньшей транспортной нагрузки или как временное решение.

На рисунке 1.2 приведена Классификация по виду и материалам дорожных покрытий СНГ (ГОСТР 59120—2021) . Капитальные дорожные одежды формируются из наиболее прочных и долговечных материалов. К ним относятся монолитные цементобетонные покрытия, сборные и монолитные армобетонные конструкции, а также железобетонные покрытия, выполняемые как в монолитном, так и в сборном варианте, в том числе из предварительно напряжённого железобетона. Широко применяются и асфальтобетонные покрытия на основе горячих и тёплых смесей, за исключением покрытий, выполненных на холодных смесях. Использование данных материалов обеспечивает высокую надёжность конструкции и её способность выдерживать интенсивные транспортные нагрузки. Облегчённые дорожные одежды характеризуются применением материалов с несколько пониженными эксплуатационными свойствами. В их состав входят асфальтобетонные смеси, в том числе на основе холодных технологий, а также органоминеральные смеси с жидкими и вязкими вяжущими. Широко используются составы с эмульгированными или комплексными органическими добавками, а также каменные материалы, обработанные органическими вяжущими [7]. Такие конструкции менее долговечны, однако они проще в устройстве и более экономичны, что определяет сферу их применения на дорогах с умеренной нагрузкой. Промежуточное положение занимают дорожные одежды переходного типа. В их конструкциях применяются щебень прочных пород без вяжущих, щебённо-гравийные и песчаные смеси, а также грунты и каменные материалы, укреплённые минеральными или органическими вяжущими. В отдельных случаях используются булыжники или колотый камень, например при устройстве мостовых покрытий. Характерной особенностью переходных

одежд является сочетание традиционных каменных материалов с укрепляющими добавками, что обеспечивает приемлемую прочность при сравнительно невысокой стоимости.



Рисунок 1.2 - Классификация по виду и материалам дорожных покрытий СНГ

Для дорожных одежд низшего типа характерно использование простейших и наиболее доступных материалов. Это гравийно-песчаные смеси, малопрочные каменные материалы, грунты, армированные геосинтетическими элементами либо улучшенные местными минеральными добавками. Кроме того, всё шире применяются материалы вторичных ресурсов промышленного производства. Такие покрытия целесообразны на дорогах низших категорий, временных и вспомогательных трассах, где интенсивность движения ограничена, а капитальные решения экономически неоправданны.

Классификатор деформаций дорожных одежд и покрытий представлен на рисунке 1.3. К первой группе относятся деформации, прямо указывающие на потерю несущей способности дорожной одежды. К ним относят различные виды трещин (продольные, косые, сеточные), выбоины в местах развития сетки трещин, ямочность и колейность. К данной категории также относят просадки, пучины и проломы. Подобные дефекты

свидетельствуют о том, что конструкция не выдерживает расчётных нагрузок и требует проведения мероприятий по усилению или ремонту.

Вторая группа объединяет деформации, которые не в явной форме отражают недостаточную прочность конструкции, но ухудшают эксплуатационные характеристики покрытия. Среди них волнообразные неровности (волны), сдвиги покрытия, шелушение поверхности, выкрашивание минерального материала, а также локальные выбоины и кромочность, проявляющаяся в разрушении краевых зон полотна. Несмотря на то, что такие дефекты не всегда напрямую связаны с потерей прочности несущих слоёв, они негативно влияют на безопасность движения, комфорт водителей и долговечность покрытия, поэтому также требуют учёта при диагностике и ремонте.

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И ПОКРЫТИЙ	
Деформации дорожных одежд, свидетельствующие о недостаточной прочности для существующей интенсивности движения	Деформации дорожного покрытия, которые в явном виде не свидетельствуют о недостаточной прочности
• Трещины • Продольные • Косые • Сетка трещин • Выбоины в сетке трещин • Ямочность • Колейность • Просадки • Пучина • Проломы	• Волны • Сдвиги • Шелушение • Выкрашивание • Выбоины • Кромочность

Рисунок 1.3 - Классификатор деформаций дорожных одежд и покрытий представлен

Для практического исследования дорожной одежды на территории Республики Казахстан были изучены архивные данные РГП на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов», выложенные в открытый доступ на сайте - <https://sapaortalygy.kz/ru/>, а также были проведены собственные исследования.

Исследование, сбор и анализ информации о параметрах и состоянии элементов дорожной одежды проводилось по автомобильным трассам республиканского значения:

1) Участок автомобильной дороги в направлении «Астана – Кокшетау» протяженность 287 км, официальное название «А-1 Астана-Петропавловск». Покрытие проезжей части выполнено из цементобетона толщиной и щебеночно-мастичного асфальта (ЩМА). Состояние удовлетворительное.

Конструкция дорожной одежды участка 17-18,2, 69,3-196,6 и 242,6 -2 67 км автомобильных дорог с покрытием из ЩМА – верхний слой покрытия - ЩМА - 5 см; нижний слой покрытия – пористый крупнозернистый асфальтобетон - 9 см, верхний слой основания из черного щебня - 12 см, нижний слой основания из фракционного щебня 0-40 мм -12 см и дополнительный слой фракционного щебня 0-80-12 см. Ширина проезжей части 22,5 и 15 м.

Конструкция дорожной одежды участков с 18,2 – 69,3 км и 196,6 – 242,6 км автомобильных дорог с покрытием из цементобетона класса В30 – 25 см, средний слой основания из щебеночно-песчаной смеси (ЩПС), укрепленной 7% цемента -18 см. Ширина проезжей части 22,5 м. Интенсивность движения 12641 авт/сут (по данным на 2023 год).

2) «Астана- Караганда» или М-36 участок «Астана-Темиртау», протяженность 78 км. Ширина проезжей части 15 м. Интенсивность движения 16005 авт/сут (на 2023 год). Состояние удовлетворительное.

Конструкция дорожной одежды:

Км 1275-1284 - верхний слой из плотного слоя мелкозернистого асфальтобетона - 5 см; нижний слой из крупнозернистого пористого асфальтобетона - 7 см, слой основания из оптимальной щебеночной смеси - 35 см;

Км 1284-1291 - верхний слой из ЩМА - 5 см; нижний слой из крупнозернистого пористого асфальтобетона - 10 см, верхний слой основания - ЩПС - 20 см; средний слой основания из оптимальной щебеночной смеси - 25 см; нижний слой основания из укрепленного шлако-цементного слоя - 30 см;

Км 1291-1308 и км 1320-1353 - верхний слой покрытия из цементобетона В30-27 см; нижний слой - ЩПС-20 см; верхний слой основания из оптимальной щебеночной смеси - 35 см; нижний слой основания -укрепленный шлако-цементный слой - 30 см.

3) Автомобильная дорога Р-2 «Астана – Коргалжын» протяженность 161 км. Ширина проезжей части 7 м. Интенсивность движения на участке км 19-51 составляет 5086 авт/сут (на 2023 год), на

участке км 51-124 интенсивность движения 633 авт/сут (по данным на 2023 год). Состояние не удовлетворительное.

4) Р-3 «Астана - Кабанбай батыра - Энтузиаст – Киевка» протяженность 35 км. Ширина проезжей части 7 м. Интенсивность движения на участке составляет 5122 авт/сут (на 2023 год). Состояние удовлетворительное.

Конструкция дорожной одежды: верхний слой из плотного слоя мелкозернистого асфальтобетона - 5 см; нижний слой из крупнозернистого пористого асфальтобетона - 10 см, верхний слой основания из крупнозернистого пористого асфальтобетона – 12 см, нижний слой основания из щебеночно-гравийно-песчанная смесь - 20 см, дополнительный слой из песка природного -15 см.

Также, был обследован участок автомобильной дороги областного значения «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба», где Акиматом Акмолинской области в текущем году проводился капитальный ремонт. Протяженность дороги охваченной капитальным ремонтом 41 км – 2 участка 0-23 км и 23-41 км.

Проектно-сметная документация разработана ТОО «ИнженерДорПроект» в 2020 году на участок от 0- 23 км.

Ширина проезжей части основной дороги составляет 6 м. Высота насыпи до 3 м. Конструктивные слои дорожной одежды представлены на рисунке 1.4.

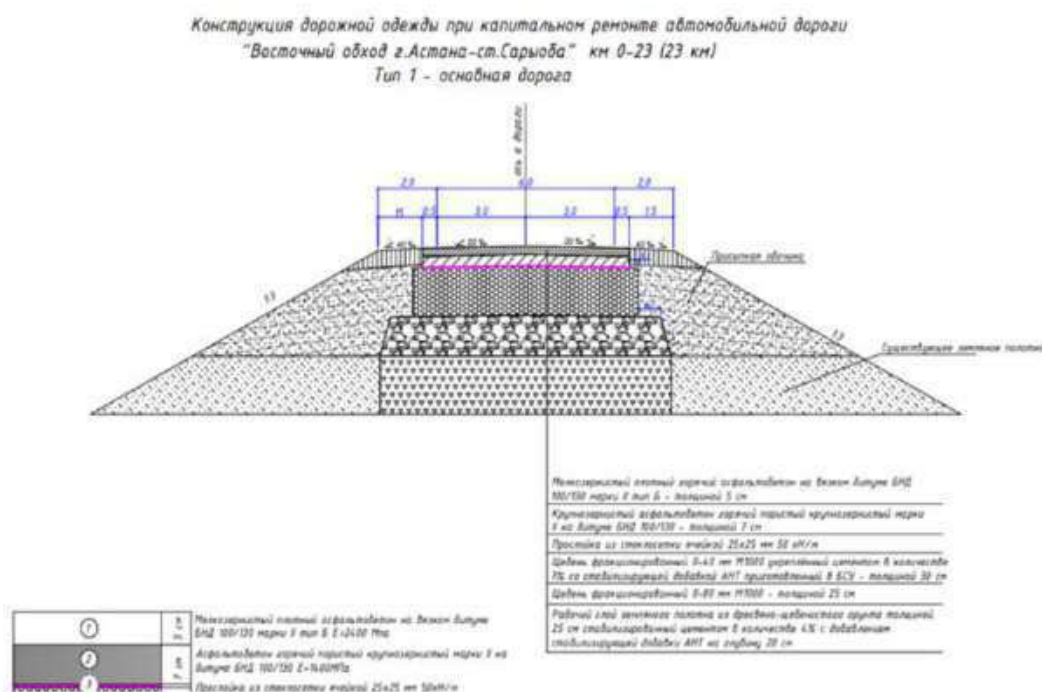


Рисунок 1.4 - Конструкция дорожной одежды

Нижний рабочий слой земляного полотна из дресвяно-щебенного грунта толщиной 25 см, стабилизированный цементом в количестве 4% с добавлением стабилизирующей добавки АНТ.

Далее, поверх рабочего слоя уложен щебень фракционированный 0-80 мм марки М1000 толщиной 25 см, поверх которого уложен 30 см слой из фракционированного щебня 0-40 мм марки М1000 укрепленный цементом в количестве 7% со стабилизирующей добавкой АНТ.

После уложена стеклосетка с размером ячейки 25х25 мм и 2 слоя асфальтобетонного покрытия (крупнозернистый пористый асфальтобетон марки 2 на битуме БНД 100/130 толщиной 7 см и мелкозернистый плотный асфальтобетон марки 2 тип Б на битуме БНД 100/130 толщиной 5 см).

Ширина проезжей части примыканий к основной дороге, также составляет 6 м. Различается конструкция дороги: рабочий слой из щебня фракционированного 0-80 мм марки М1000 толщиной 20 см, поверх которого уложен 15 см слой из фракционированного щебня 0-40 мм марки М1000 укрепленный цементом в количестве 7% со стабилизирующей добавкой АНТ.

После уложена стеклосетка с размером ячейки 25х25 мм и 2 слоя асфальтобетонного покрытия (крупнозернистый пористый асфальтобетон марки 2 на битуме БНД 100/130 толщиной 6 см и мелкозернистый плотный асфальтобетон марки 2 тип Б на битуме БНД 100/130 толщиной 4 см).

Основание дороги уложено на грунт представленный дресвой, суглинком, супесями и глинами.

1.3. Аномалии дорожного покрытия

Многолетняя эксплуатация автомобильных дорог неизбежно сопровождается процессами износа и разрушения дорожной одежды. Под воздействием транспортных нагрузок, климатических факторов и водно-теплового режима в слоях покрытия и основания формируются различные аномалии — отклонения от проектного состояния, ухудшающие эксплуатационные характеристики дороги.

В практике отечественного и международного дорожного строительства аномалии принято разделять на две основные группы:

Дефекты, связанные с недостаточной прочностью дорожной конструкции.

Дефекты, не свидетельствующие напрямую о потере прочности, но снижающие эксплуатационные качества.

Аномалии, указывающие на недостаточную прочность.

К этой группе относят дефекты, напрямую отражающие потерю несущей способности покрытия и основания:

- трещины (продольные, поперечные, косые и сеточные), возникающие в результате температурных напряжений и усталостных явлений в асфальтобетоне;

- ямочность и выбоины, развивающиеся при разрушении связей между минеральным скелетом и вяжущим;

- колейность, характерная для дорог с высокой интенсивностью движения тяжёлого автотранспорта и свидетельствующая о пластических деформациях в слоях покрытия;

- просадки и проломы, вызванные потерей прочности основания или неравномерной работой земляного полотна;

- пучины, возникающие в результате морозного пучения при нарушении дренажа и высокой влажности грунтов.

Эти дефекты существенно снижают несущую способность конструкции и требуют капитального ремонта или усиления дорожной одежды.

Аномалии, не свидетельствующие о недостаточной прочности.

Вторая группа включает деформации, которые не всегда связаны с разрушением конструкции, но негативно влияют на безопасность и комфорт движения:

- волны и сдвиги покрытия, возникающие в местах торможения и разгона транспорта из-за пластичности асфальтобетона;

- шелушение и выкрашивание, приводящие к потере верхнего слоя мелкого заполнителя;

- кромочность, проявляющаяся в разрушении краевых зон покрытия при недостаточной ширине укрепленной обочины.

Подобные дефекты являются сигналом для проведения профилактического или среднего ремонта, поскольку их развитие может ускорить формирование более серьёзных повреждений.

Анализ эксплуатационных данных и результаты обследований НЦКДА показывают, что основные причины образования аномалий дорожного покрытия заключаются в следующем:

- интенсивное транспортное воздействие, в первую очередь от грузовых автомобилей с осевыми нагрузками, превышающими нормативные;
- климатические факторы — резкие колебания температур, глубокое промерзание и оттаивание, переувлажнение дорожных конструкций;
- конструктивные и технологические ошибки — применение некачественных материалов, недостаточное уплотнение слоёв, нарушение технологии укладки;
- водно-тепловой режим дорожной одежды и земляного полотна, при котором происходит накопление влаги, вызывающей потерю несущей способности.

Для наглядного представления наиболее распространённых дефектов, встречающихся на автомобильных дорогах Республики Казахстан, было проведено георадарное обследование земляного полотна, основания и покрытий с использованием комплекса «ОКО-2» (антенные блоки АБ-400Р и АБ-1000Р). Выполненная съёмка обеспечила получение объективных данных о состоянии дорожной конструкции и локализации аномалий.

На рисунке 1.5 приведена радарограмма с диагностируемой аномалией, свидетельствующей о наличии дефекта дорожной одежды.



Рисунок 1.5 - Радарограмма с аномалией дефекта дорожной одежды

В ходе выезда было проведено георадарное измерение с помощью прибора «Око-2» (АБ-400Р и АБ-1000Р) по уложенным конструктивными слоями дорожной одежды:

- нижнего слой основания из щебоночно-печанной смеси С4;
- верхнего слоя основания из щебоночно-песчанной смеси С6, обработанной портландцементом М-400 в количестве 7%.
- нижнего слоя покрытия горячим крупнозернистым пористым асфальтобетонном Марки 2.

Георадарные измерения с использованием прибора «ОКО-2» (антенные блоки АБ-400Р и АБ-1000Р) на участке автомобильной дороги Р-2 «Астана – Коргалжын» с подъездом к Коргалжынскому заповеднику проводились в местах, характеризующихся наличием явных дефектов и аномалий, таких как разрушения покрытия и ямочность, свидетельствующие о нарушении прочностных свойств основания.

На рисунке 1.6 представлены фотографии наиболее распространённых дефектов, выявленных на участке автомобильной дороги Р-2 «Астана – Коргалжын». Они наглядно демонстрируют разрушения покрытия, ямочность и другие аномалии, оказывающие негативное влияние на эксплуатационное состояние дорожной одежды.



Рисунок 1.6 - Дефекты дорожного покрытия

Полевые измерения выполнялись в местах с визуально фиксируемыми повреждениями покрытия. Выбор данного участка был обусловлен наличием разнообразных по типу и степени выраженности дефектов дорожного покрытия, что позволило провести оценку эффективности применения георадарного комплекса для обнаружения скрытых неоднородностей в слоях дорожной конструкции.

На рисунке 1.7 дефекты дорожного покрытия, обнаруженные при исследовании трассы А-1 «Астана — Кабанбай батыр» на расстоянии 22–22,5 км был обнаружен дефект дорожного покрытия.



Рисунок 1.7 - Дефекты дорожного покрытия А-1 «Астана — Кабанбай

На рисунке 1.8 представлены дефекты дорожного покрытия автомобильной дороги Р-2 «Энтузиаст (Ахметауыл) – Киевка (Нура)».

Выявленная аномалия свидетельствует о повреждении конструкции, требующем дополнительного обследования и принятия мер по восстановлению эксплуатационных характеристик дорожной одежды.



Рисунок 1.8 - Дефекты дорожного покрытия автомобильной дороги Р-2 «Энтузиаст (Ахметауыл) – Киевка (Нура)»

На рисунке 1.9 показан фрагмент дороги по маршруту «Астана – Нура (Киевка) – Темиртау – Караганда» на 157–157,5 км, где выявлен дефект дорожного покрытия.



Рисунок 1.9 - Дефекты дорожного покрытия «Астана – Нура (Киевка) – Темиртау – Караганда»

Предполагаемой причиной образования трещины являются температурно-усадочные процессы, усталостные нагрузки от транспортного потока, а также недостаточная эластичность или уплотнённость слоя основания. При отсутствии своевременного

ремонта данные дефекты могут привести к ускоренному разрушению дорожной одежды, образованию выбоин, расширению трещин и снижению сцепных свойств покрытия.

В таблице 1.1 представлены выявленные дефекты на участке республиканской автомобильной дороги по маршруту «Астана – Нура (Киевка) – Темиртау – Караганда».

Таблица 1.1. Таблица выявленных дефектов на участке республиканской автомобильной дороги участке по маршруту Астана -Нура (Киевка)-Темиртау — Караганда

№ дефекта	Координата (км)	Тип дефекта	Протяжённость (м)	Глубина подповерхностной аномалии (м)	Комментарий
1	103.5	Продольно-поперечная трещина	2,5–3,0 по ширине полотна	до 0,6	Пустота/переувлажнение
2	105.0	Просадка покрытия	3,0	до 0,8	Снижение несущей способности
3	108.2	Продольная трещина	2,0	до 0,5	Инородное включение
4	110.7	Сеть микротрещин	1,5	—	Начальная стадия разрушения
5	112.9	Поперечная трещина	2,5	до 0,4	Переувлажнение основания
6	115.3	Просадка/выбоина	3,5	до 0,7	Разуплотнение
7	118.6	Продольно-поперечная трещина	2,5	до 0,5	Потеря несущей способности
8	120.0	Крупная трещина (аномалия)	2,5–3,0	до 0,6	Выявлена аномалия на радарограмме
9	123.4	Поперечная трещина	2,0	до 0,4	Слабая зона основания
10	126.1	Просадка покрытия	3,0	до 0,6	Пустота
11	129.7	Продольная трещина	2,5	до 0,5	Переувлажнение
12	133.2	Сеть микротрещин	1,5	—	Поверхностный дефект
13	138.5	Продольно-поперечная трещина	3,0	до 0,6	Потеря несущей способности
14	142.0	Поперечная трещина	2,0	до 0,4	Усталостные нагрузки
15	146.8	Просадка/выбоина	3,5	до 0,8	Разуплотнение основания

№ дефекта	Координата (км)	Тип дефекта	Протяжённость (м)	Глубина подповерхностной аномалии (м)	Комментарий
16	151.3	Продольная трещина	2,5	до 0,5	Переувлажнение
17	160.4	Крупная трещина (аномалия)	2,5–3,0	до 0,7	Аномалия на радарограмме
18	166.0	Поперечная трещина	2,0	до 0,4	Пустота
19	170.5	Просадка покрытия	3,0	до 0,6	Слабое основание
20	175.0	Продольно-поперечная трещина	2,5	до 0,6	Разрушение основания

На рисунке 1.10 представлена схема дефектов дорожного покрытия для участка 103–175 км.

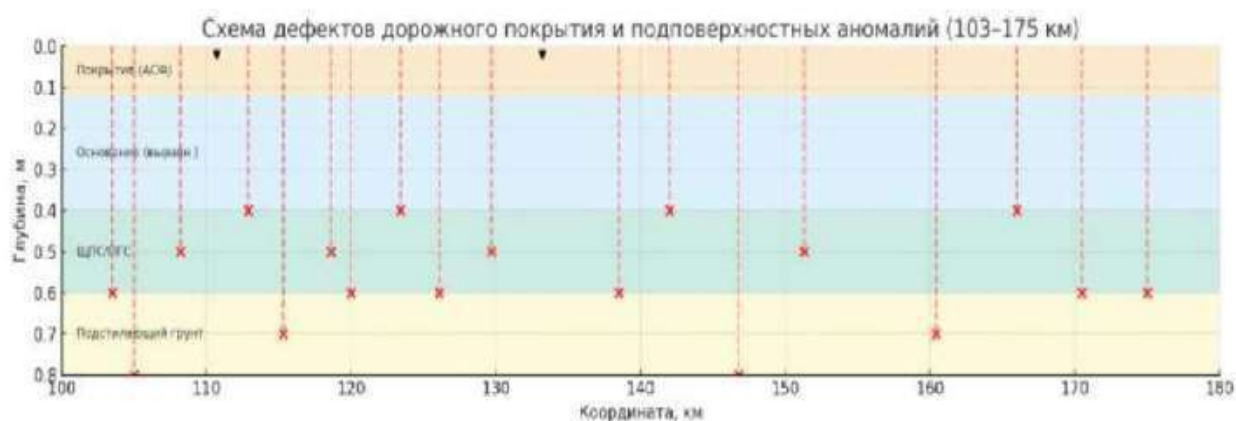


Рисунок 1.10 - Схема дефектов дорожного покрытия для участка 103–175 км

На схеме:
по горизонтали — километраж (100-180 км),
по вертикали — глубина до 0,8 м,
красные точки и штриховые линии — подповерхностные аномалии (глубина указана по данным таблицы),
чёрные маркеры «v» — поверхностные дефекты (микротрещины без глубокой аномалии).

На представленной схеме показано пространственное распределение выявленных дефектов дорожного покрытия и подповерхностных аномалий по участку трассы с 103 по 175 км. По горизонтальной оси нанесён километраж, по вертикальной — глубина зондирования до 0,8 м. Маркеры красного цвета отражают

точки с зарегистрированными подповерхностными аномалиями различной глубины, тогда как чёрные маркеры в виде треугольников обозначают поверхностные дефекты, локализованные преимущественно в верхнем слое покрытия.

Схема демонстрирует, что дефекты распределены неравномерно: их концентрация выше на участках 49–53 км, 63–67 км и 70–71 км. Выявленные аномалии имеют глубину от 0,4 до 0,8 м, что соответствует зонам основания и подстилающего слоя. Это может свидетельствовать о переувлажнении, пустотах или разуплотнении материала. Часть дефектов фиксируется только на поверхности в виде трещин или просадок, что подтверждает стадию начального разрушения асфальтобетонного слоя без значительных изменений в основании.

Зафиксированы локальные дефекты, в частности продольно-поперечная трещина по всей ширине полотна и аномальные зоны повышенной амплитуды на отметке ~120 м, что указывает на возможные пустоты или переувлажнение основания. Эти результаты подтверждают эффективность георадиолокации как метода неразрушающего контроля и создают основу для разработки рекомендаций по ремонту и мониторингу дорожной одежды.

Выводы по подразделу: выполнена классификация и анализ причин возникновения аномалий дорожной одежды на основе литературных источников и нормативных документов. Рассмотрены дефекты, связанные как с потерей несущей способности дорожной конструкции, так и с ухудшением эксплуатационных характеристик покрытия. Практическая часть исследования включала георадарное обследование участков автомобильных дорог Акмолинской области с использованием комплекса «ОКО-2». Анализ георадарных данных позволил выявить скрытые подповерхностные неоднородности, недоступные визуальному контролю, что подтверждает высокую информативность и инженерную значимость метода для диагностики дорожных конструкций. Результаты исследования обеспечивают основание для разработки рекомендаций по ремонту и мониторингу состояния автомобильных дорог.

2 АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

2.1 Общие подходы к цифровой обработке сигналов

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) является ключевым этапом в системе георадиолокационных исследований дорожных конструкций. Именно на этом этапе обеспечивается извлечение максимально информативной составляющей из исходных данных, снижение уровня помех и приведение сигналов к форме, удобной для последующей интерпретации. В отличие от традиционных аналоговых методов, цифровая обработка предоставляет широкие возможности для адаптации алгоритмов, применения сложных математических моделей и автоматизации анализа [10-13].

Фильтрация и подавление помех. Одним из базовых направлений цифровой обработки является фильтрация сигналов [12-13]. В георадарных измерениях большое значение имеет подавление как низкочастотных дрейфов, связанных с аппаратными и погодными факторами, так и высокочастотных шумов, возникающих при распространении волн в среде. Для этого используются цифровые фильтры различных типов: фильтры низких частот (ФНЧ), высоких частот (ФВЧ), полосовые и адаптивные. Применение фильтров позволяет выделить полезную часть сигнала и повысить соотношение сигнал/шум, что критически важно для корректного выделения границ слоёв дорожной одежды.

Преобразования сигналов. Для получения дополнительных характеристик сигналов используются методы спектрального и временно-частотного анализа. Наиболее распространёнными являются быстрое преобразование Фурье (БПФ), позволяющее выявить спектральный состав сигналов, преобразование Гильберта для выделения огибающей и амплитудно-частотных характеристик, а также вейвлет-преобразование, обеспечивающее локальный анализ сигналов в различных масштабах. Последний метод особенно эффективен при исследовании сигналов со сложной структурой и различной длительностью импульсов, что характерно для георадарных измерений на неоднородных объектах.

Деконволюция и восстановление формы сигнала. Существенное влияние на получаемый сигнал оказывает собственная форма зондирующего импульса и аппаратные искажения. Для устранения этих эффектов применяется деконволюция, позволяющая восстановить истинный вид отражённого сигнала. Данный подход особенно важен при необходимости точного определения толщины тонких слоёв дорожных покрытий и при диагностике локальных дефектов.

Адаптивные методы обработки. В реальных условиях свойства среды и характеристики сигналов изменяются в зависимости от влажности, температуры и состава материалов дорожной конструкции. Поэтому классические методы фильтрации не всегда дают достаточный результат. Адаптивные алгоритмы позволяют автоматически изменять параметры обработки в зависимости от входных данных, что обеспечивает более высокую устойчивость к вариациям среды.

Статистические методы. Для повышения достоверности результатов часто применяется статистическая обработка сигналов: усреднение, когерентное накопление, корреляционный анализ. Эти методы позволяют снизить влияние случайных шумов, выделить повторяющиеся закономерности и увеличить надёжность интерпретации данных.

Комплексный подход. В современных системах обработки сигналов, как правило, используются комбинации перечисленных методов. Например, первичная фильтрация может сочетаться с вейвлет-анализом и последующей деконволюцией. Такой подход обеспечивает многоступенчатое улучшение качества данных, позволяя не только визуально повысить разборчивость радарограмм, но и обеспечить количественную оценку параметров дорожных конструкций.

2.2 Алгоритм вейвлет-преобразования зондирующих георадиолокационных сигналов

При обработке георадиолокационных данных, необходимо выделить полезный сигнала на фоне помех и шума. В этом случае используют отличие их характеристик от соответствующих характеристик шума и волн-помех [13-16].

Для первичной обработки радарограммы используют вейвлет преобразование, с помощью которой вейвлет в радарограмме можно уменьшить влияние высокочастотных составляющих в спектре сигнала.

Представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций (2.1) [17], имеет вид:

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1)$$

Здесь: $\psi(t)$ материнский (порождающий) вейвлет, за счет изменения временного масштаба – **a** и операции сдвига во времени – **b**. Сигнал представляется в виде совокупности последовательных приближений $A_j(t)$ и детализирующей $D_j(t)$ составляющих (2.2):

$$f(t) = A_j(t) + \sum_{i=1}^j D_i(t) \quad (2.2)$$

Представление каждой составляющей сигнала вейвлетами можно рассматривать как в частотной области и во временной. Сигнал $f(t)$ разлагается на две составляющие (2.3):

$$f(t) = \sum_k a_k \varphi_k(t) + \sum_k d_k \psi_k(t) \quad (2.3)$$

Базисные функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ определяются из соотношений:

$$\varphi(t) = 2 \sum_l h_l \varphi(2t - l) \quad (2.4)$$

$$\psi(t) = 2 \sum_l g_l \psi(2t - l) \quad (2.5)$$

Вейвлет-коэффициенты уменьшается в два раза, и определяются из соотношений (2.6) и (2.7):

$$a_{j+1,k} = \sum_l h_{l-2,k} a_{j,k} \quad (2.6)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_l g_{l-2,k} a_{j,k} \quad (2.7)$$

где $g_l = (-1)^l h_{2n-l-1}$.

Восстановление сигнала по его вейвлет-коэффициентам на каждом шаге описывается соотношением (2.8) [17]:

$$a_{j-1,k} = \sum_l (h_{k-2l} a_{j,l} + g_{k-2l} a_{j,l}) \quad (2.8)$$

Очистка сигнала от шума проводится использованием вейвлета Добеши db4 [18], которые не имеют аналитического представления и определяются фильтрами. На практике используются аппроксимирующие h_k и детализирующие g_k вейвлет-коэффициенты, без вычисления вида вейвлетов [19]. Вейвлет db4 имеет следующие коэффициенты:

$$\begin{aligned} h_0 &= 0.482962913144534, g_0 = h_3. \\ h_1 &= 0.8365163037378079, g_1 = -h_2. \\ h_2 &= 0.2241438680420134, g_2 = h_1. \\ h_3 &= -0.1294095225512604, g_3 = -h_0. \end{aligned}$$

Составляющие дискретных вейвлетов Добеши определяется из:

$$\begin{aligned} a_i &= h_0 s_{2i-1} + h_1 s_{2i} + h_2 s_{2i+1} + h_3 s_{2i+2} \\ d_i &= g_0 s_{2i-1} + g_1 s_{2i} + g_2 s_{2i+1} + g_3 s_{2i+2} \quad i=1, 2, \dots, n/2-1 \\ a_{n/2} &= h_0 s_{n-2} + h_1 s_{n-1} + h_2 s_0 + h_3 s_1 \\ d_{n/2} &= g_0 s_{n-2} + g_1 s_{n-1} + g_2 s_0 + g_3 s_1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

По формуле (2.9) является пирамидальным алгоритмом вычисления вейвлет-коэффициентов Малла [19]. Этими формулами цифровой фильтр h_n из сигнала s_k выделяет низкие частоты, а фильтр g_n выделяет верхние частоты. Применяя низкочастотный фильтр, получим коэффициенты аппроксимации a_i , высокочастотный фильтр, получим детализирующие коэффициенты d_i .

Для снижения уровня шумов при обработке сигналов по технологии вейвлет-анализа используем метод – трешолдинг.

В методе трешолдинга порог ограничения устанавливаем отдельно для каждого коэффициента. При решении задачи шумоподавления необходимо: оценить

Приведем два основных правила порогового обрезания вейвлет-коэффициентов:

$$1) \quad \text{«жесткое» (hard thresholding): } d_i = \begin{cases} 0, & |d_i| \leq \lambda, \\ d_i & |d_i| > \lambda. \end{cases}$$

$$2) \quad \text{«мягкое» (soft thresholding): } d_i = \begin{cases} 0, & |d_i| \leq \lambda, \\ \text{sign}(d_i)(|d_i| - \lambda), & |d_i| > \lambda. \end{cases}$$

Где: λ - значение порога обрезания (threshold value).

По критерию Штейна можно найти оптимальное значение порога [20] :

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \ln n} \sigma = \text{median}(|d_i|)/0,6475 \quad (2.10)$$

n – количество отсчетов обрабатываемого сигнала на текущей итерации.

При восстановлении сигнала по его вейвлет-коэффициентам вычисляем по формулами (2.11) [21]:

$$\begin{aligned} a_1 &= h_2 s_{\frac{n}{2}} + h_1 s_n + h_0 s_1 + h_3 s_{\frac{n}{2}-1} \\ a_2 &= g_0 s_{\frac{n}{2}} + g_1 s_{\frac{n}{2}-1} + g_2 s_1 + g_3 s_n \\ a_i &= h_2 s_{\frac{i-1}{2}} + h_1 s_{\frac{i-1}{2}+\frac{n}{2}} + h_0 s_{\frac{i-1}{2}+1} + h_3 s_{\frac{i-1}{2}+\frac{n}{2}-1} \quad i=3, 5, \dots, n/2 - 1 \text{ (нечетные)} \\ a_i &= g_0 s_{\frac{i-1}{2}} + g_1 s_{\frac{i-1}{2}+\frac{n}{2}-1} + g_2 s_{\frac{i-1}{2}+1} + g_3 s_{\frac{i-1}{2}+\frac{n}{2}} \quad i=4, 6, \dots, n/2 \text{ (четные)} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Нами разработано программное обеспечение для вейвлет-обработки радарограмм и реализована функция вычисления спектра исходного и очищенного сигнала с применением преобразования Фурье.

Интерфейс программы представлен на рисунке 2.1.

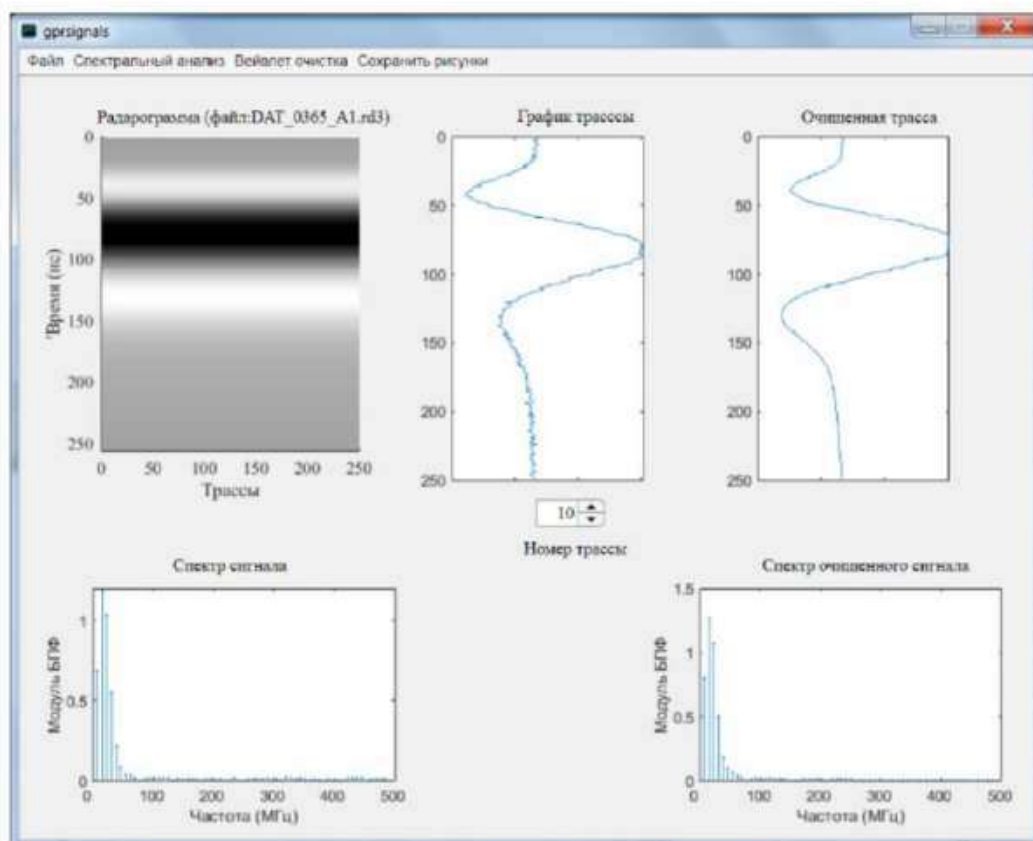


Рисунок 2.1. – Спектральный анализ

2.3 Алгоритм преобразования Гильберта зондирующих сигналов

Для обработки сигналов, используют формулы Гильберта [22]–[23]. Использование этой формулы предназначены для задач первичной обработки георадарных данных. В частности, обнаружение локальных максимумов модуля преобразования позволяет выделить контактные границы, на которых формируются отражения. Если в исследуемой среде присутствуют локальные включения, проявляющиеся на радарограмме в виде гипербола, то применение данного метода повышает надёжность их идентификации.

Преобразование Гильберта функции $u(t)$ имеет вид:

$$H[u](t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(\tau) d\tau}{t - \tau} \quad (2.12)$$

Нами проведены численные расчеты, и на рисунке 5 представлена изображение волнового поля и преобразования Гильберта для радарограммы дорожной одежды (четырёхслойной среды). Приведем дискретные формулы:

$$S(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} E(k\Delta t) \cdot \exp(-i2\pi kn / N), \quad n = 0, 1, \dots, N/2. \quad (2.13)$$

$$H(k\Delta t) = 2 \cdot \sum_{n=1}^{N/2} S(n) \cdot \exp(2\pi kn / N), \quad k = 0, 1, \dots, N. \quad (2.14)$$

Применение преобразования Гильберта – определение максимумов модуля образа позволяет уточнить местоположение границ горизонтально-слоистой среды, где происходило отражение сигнала, и так же это позволяет уточнить местоположение локальных включений в среде, параметры которой необходимо определить. На рисунке 2.2 показана сглаженная радарограмма и модуль образа преобразования Гильберта. Чёрными точками отмечены места на радарограмме, соответствующие точкам раздела слоёв.

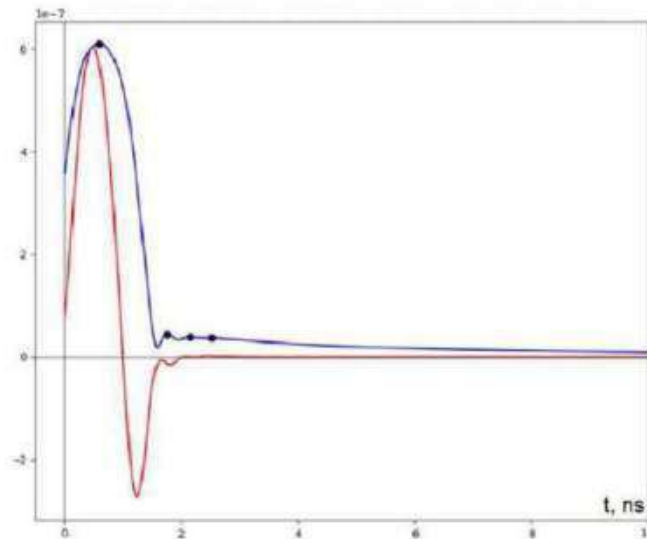


Рисунок 2.2 - Сглаженная радарограмма (красная линия) и модуль ее изображения с преобразованием Гильберта (синяя линия)

Примечание – Черными точками отмечены места на радарограмме, соответствующие границам слоев

Модуль, реализующий преобразование Гильберта, играет ключевую роль в: уточнении геометрии слоистой структуры среды;

корректной установке начальных условий для задачи продолжения электромагнитного поля; формировании массива входных признаков для алгоритмов инверсии и машинного обучения.

Таким образом, внедрение преобразования Гильберта в цепочку обработки сигналов позволяет существенно повысить точность автоматизированной интерпретации георадиолокационных данных и повысить информативность визуализируемых результатов [22-23].

2.4 Алгоритм очистки георадиолокационного сигнала цифровыми фильтрами

Для комплексного обследования дорожных конструкций при определении толщины конструктивных слоев дорожной одежды, а также мощности и состояния грунтов земляного полотна и подстилающего основания, требуются георадары с различными типами антенн, работающих на разных частотах [24][25]. Выбор антенны в системе георадара определяет частоту электромагнитного импульса, влияющего на глубину проникновения и разрешение получаемого изображения. Более низкие частоты проникают глубже, но обеспечивают меньшее разрешение, в то время как более высокие частоты обеспечивают большее разрешение, но меньшее проникновение. Рупорные (бесконтактные) антенны, располагаются на высоте 0,4-0,7 м от поверхности исследуемой среды. Данные антенны работают на частоте от 250 МГц и выше. Георадары с рупорными антеннами целесообразно использовать для определения толщины слоев дорожной одежды и верхней части земляного полотна, в сочетании с автомобилем, при обследовании участков автомобильных дорог большой протяженности, в том числе, в движущемся транспортном потоке. Георадары с такими антеннами эффективно используются для определения толщины покрытия и слоев основания дорожной одежды на глубину от 0,2 до 3 м. Для исследования дорожной одежды использовался автомобильная лаборатория, оснащенная двумя рупорными антеннами 400 МГц и 1000 МГц (рисунок 2.3).

Все георадиолокационные данные содержат низкочастотную составляющую, связанный с электростатическими и индуктивными полями вблизи антенны, воздушные отражения, образование

которых связано с отражением от объектов, находящихся над поверхностью земли (деревья, столбы, линии электропередачи). В большинстве случаев, помимо отражений, выделяется еще и шум. Для удаления таких сигналов применяется фильтр dewow разработанный для удаления нежелательных низких частот при сохранении высокочастотного сигнала [26][27].

Фильтрация dewow устраняет низкочастотные помехи и смещения постоянного тока в данных наземных радаров. Низкочастотный шум, возникает из-за насыщения электронных устройств высокоамплитудными сигналами от прямых и воздушных волн [18].

Фильтрация dewow применяется для удаления плоских сигналов (сигналов, которые прибывают с одинаковым временем прохождения или глубиной), которые присутствуют на всех трассах в линии георадара; обычно прямые воздушные и наземные прибытия в верхней части профиля радарограммы или полосы шума системы (рисунок 2.4).

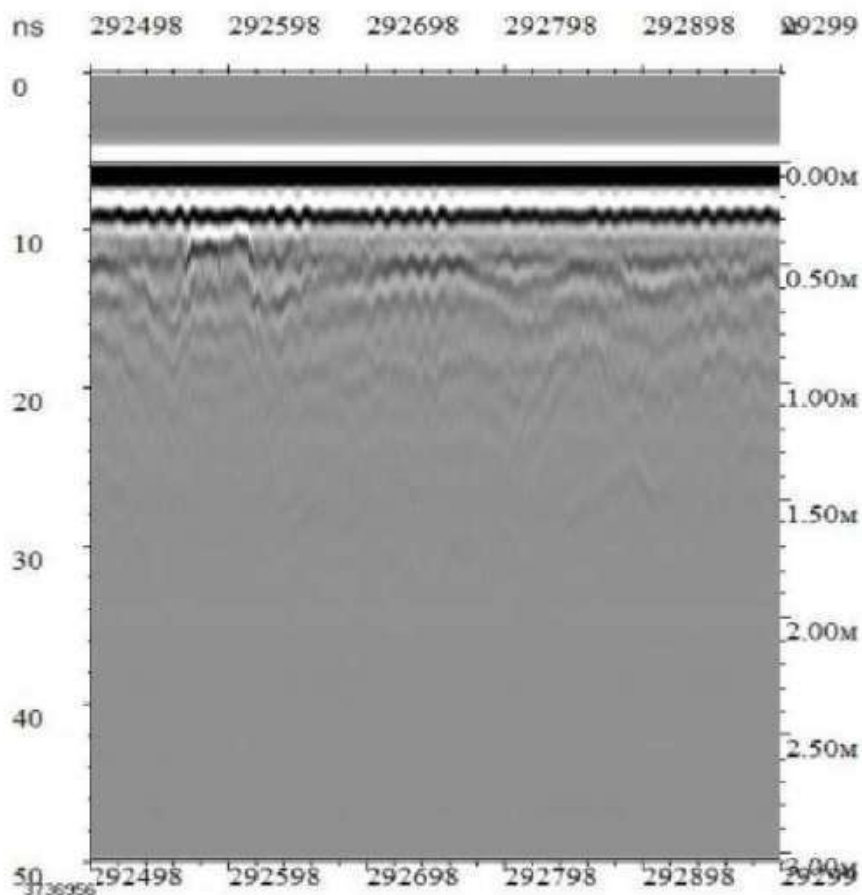


Рисунок 2.3 - Профиль исходной радарограммы

Dewow фильтрация является эффективным средством для удаления постоянной составляющей сигнала, позволяет вычитать сигнал прямого прохождения, который, как правило, не несет полезной информации. Также можно устранять помехи, имеющие форму протяженных горизонтальных полос [30-31]. При обработке георадарных данных полученных с отрывом антенного блока от поверхности дорожного покрытия, рекомендуется применять технологию dewow к трассам радарограмм перед любыми другими этапами обработки.

Принцип этой обработки состоит в том, что вычисляется среднее арифметическое группы отсчетов, которые находятся на одной горизонтали. Затем эта величина вычитается поочередно из каждого отсчета этой горизонтали [32]. В большинстве случаев при обработке георадиолокационных данных рекомендуется применять фильтр dewow перед любыми другими этапами обработки.

Профиль радарограммы после применения dewow фильтра представлен на рисунке 2.4.

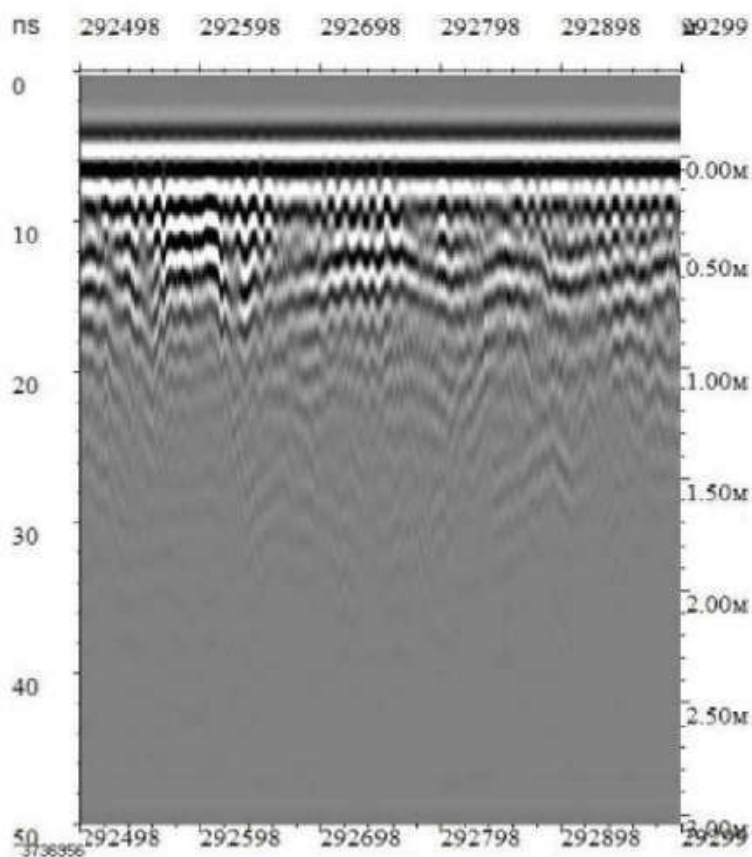


Рисунок 2.4 - Профиль после dewow фильтрации

Спектры трассы до и после фильтрации представлены на рисунках 2.5 – 2.6.

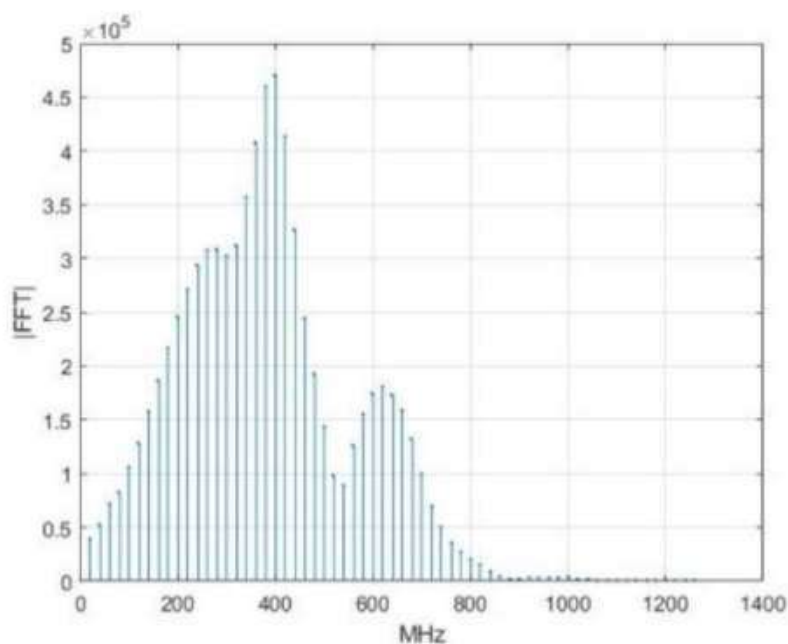


Рисунок 2.5 - Спектр исходной трассы

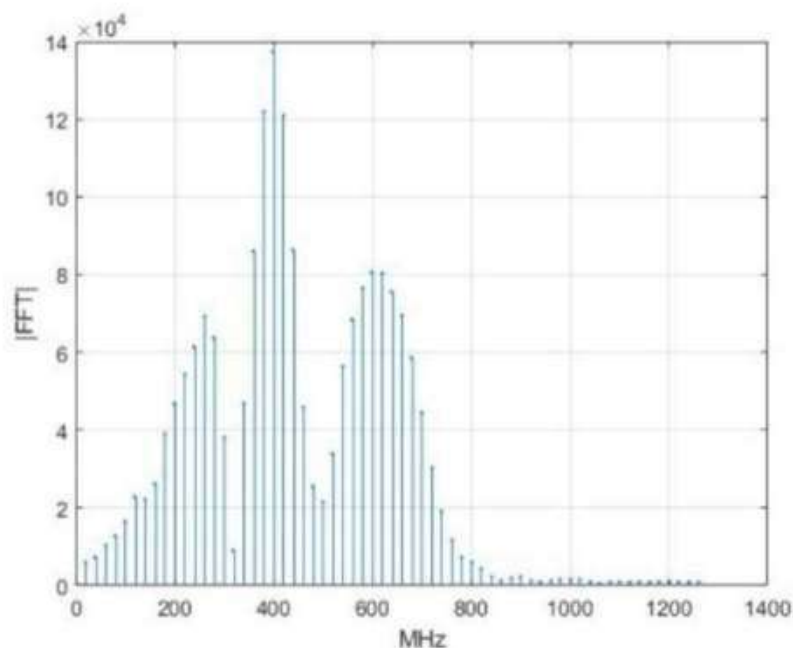


Рисунок 2.6 - Спектр трассы после dewow фильтрации

Dewow фильтрация радарограммы антенного блока 1000МГц. Измерения проводился георадаром с рупорной антенной с частотой сигнала 1ГГц. Длина сканированного участка дороги 500м. В профиле 3334 трасс измеренная с шагом 15см. Рассмотрим 610 трассу из радарограммы антенного блока 1 ГГц. Свойства трассы:

период дискретизации 0.03125 нс, частота дискретизации 32000 МГц, длина сигнала 512, время сканирования трассы 16 нс. Профили исходной и после применения dewow фильтра представлены на рисунках 2.7 и 2.8.

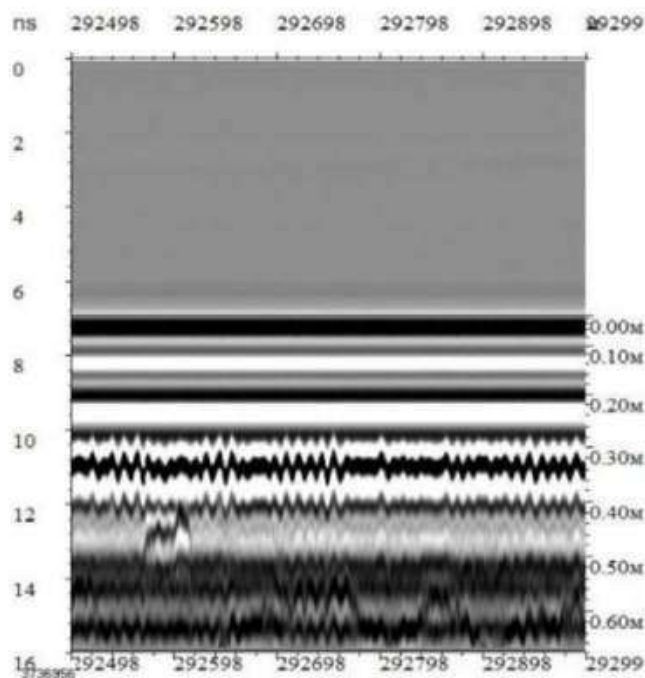


Рисунок 2.7 - Профиль исходной радарограммы.

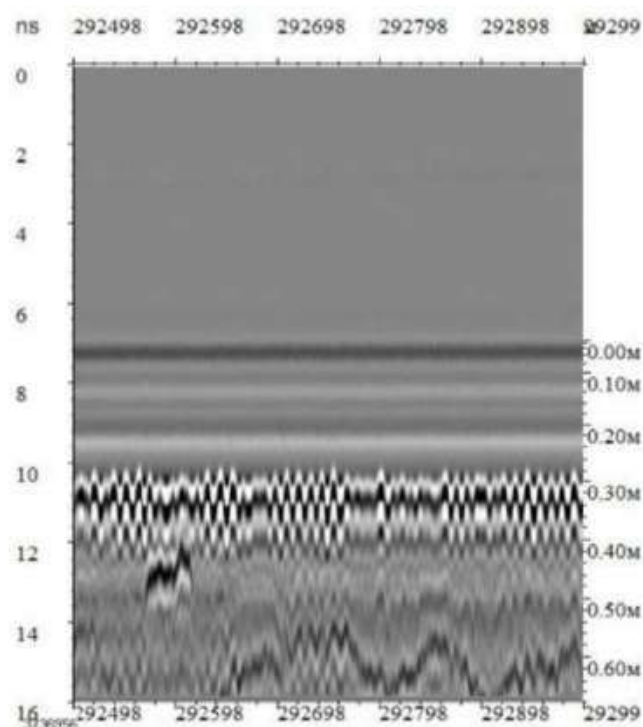


Рисунок 2.8 - Профиль радарограммы после фильтрации

Спектры трасс до и после фильтрации приводнены на рисунках 2.9 и 2.10.

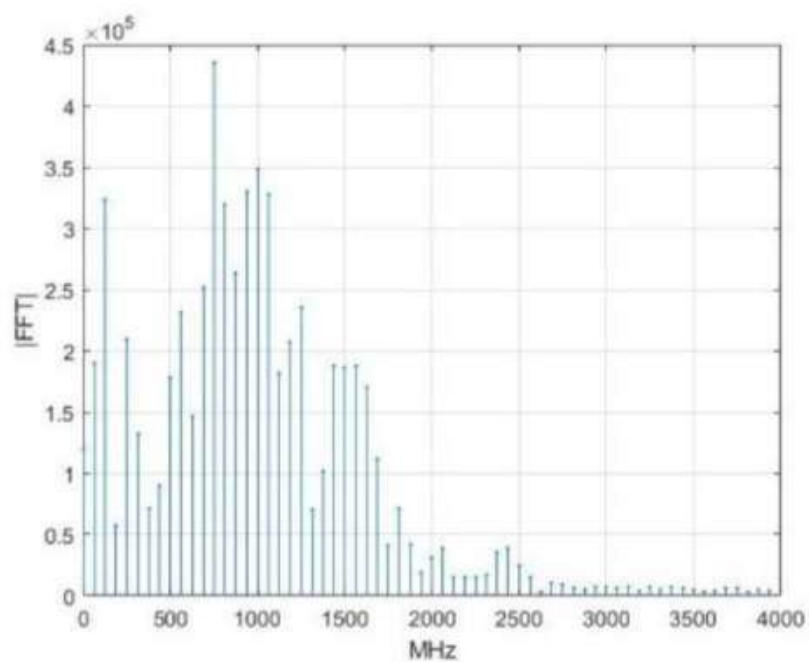


Рисунок 2.9 - Спектр исходной трассы

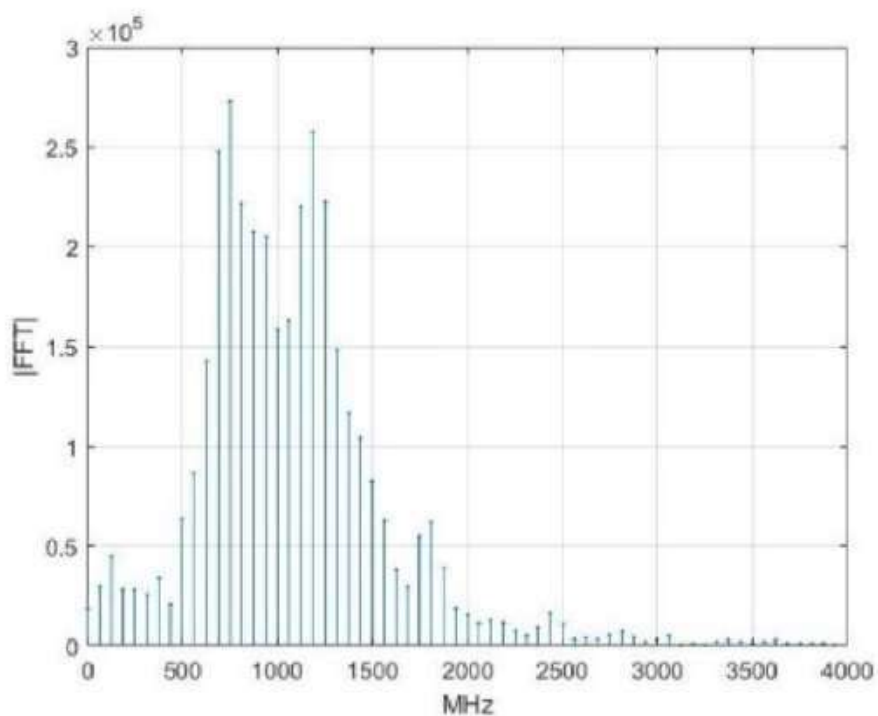


Рисунок 2.10 - Спектр трассы после dewow фильтрации

Полосовая фильтрация радарограммы. При частотной фильтрации параметры фильтра вычисляем с использованием спектра сигнала [33-36].

С помощью полосовой фильтрации полезные сигналы можно улучшить за счет внеполосного шума. Полосовой фильтр разработан с использованием концепций фильтрации с преобразованием Фурье [37-38].

Характеристики полосового фильтра определяются его центральной частотой и полосой пропускания. Центральная частота представляет собой среднюю точку желаемого частотного диапазона, а полоса пропускания определяет диапазон частот вокруг центральной частоты, которые могут проходить с минимальным затуханием.

Для фильтрации трасс радарограмм были синтезированы передаточные функции полосового БИХ фильтра Баттерворта 4 порядка в среде MatLab Filter Designer.

При разбиении передаточной функции на секции значительно снижает чувствительность к квантованию коэффициентов фильтра [32, 39]. Поэтому мы используем конфигурацию БИХ фильтра, (Second order section - SOS).

$$H(z) = \prod_{k=1}^K H_k(z) = \prod_{k=1}^K \left(\frac{b_{0k} + b_{1k}z^{-1} + b_{2k}z^{-2}}{1 + a_{1k}z^{-1} + a_{2k}z^{-2}} \right)$$

где, K – количество секции 2-го порядка, b_{0k} , b_{1k} , b_{2k} , a_{1k} , a_{2k} – вещественные коэффициенты SOS матрица 2 порядка:

$$\begin{Bmatrix} b_{01} & b_{11} & b_{21} & a_{01} & a_{11} & a_{21} \\ b_{02} & b_{12} & b_{22} & a_{02} & a_{12} & a_{22} \end{Bmatrix}$$

При прямой структуре секции данному виду передаточной функции соответствует система разностных уравнений:

$$\begin{aligned} v_i &= g_1(b_{01}x_i + b_{11}x_{i-1} + b_{21}x_{i-2} - a_{11}v_{i-1} - a_{21}v_{i-2}) \\ y_i &= g_2(b_{02}v_i + b_{12}v_{i-1} + b_{22}v_{i-2} - a_{12}y_{i-1} - a_{22}y_{i-2}) \end{aligned}$$

где, g_1 , g_2 – коэффициенты усиления, $i = 1, 2, \dots, n$. $n = 512$ - количество значений в трассе радарограммы.

БИХ фильтра четвертого порядка на основе двух биквадратных секций реализовано по каноническим формулам:

$$\begin{aligned}v_i &= x_i - a_{11}v_{i-1} - a_{21}v_{i-2} \\w_i &= g_1(b_{01}v_i + b_{11}v_{i-1} + b_{21}v_{i-2}) \\p_i &= w_i - a_{12}p_{i-1} - a_{22}p_{i-2} \\w_i &= g_1(b_{01}v_i + b_{11}v_{i-1} + b_{21}v_{i-2})\end{aligned}$$

Полосовая фильтрация радарограммы антенного блока 400МГц

Передаточная функция полосового фильтра Баттерворта с полосой пропускания от 280 МГц до 520 МГц был синтезирован в среде MatLab Filter Designer.

Амплитудно-частотная характеристик разработанного полосового БИХ фильтра Баттерворта фильтра представлен на рисунке 2.11.

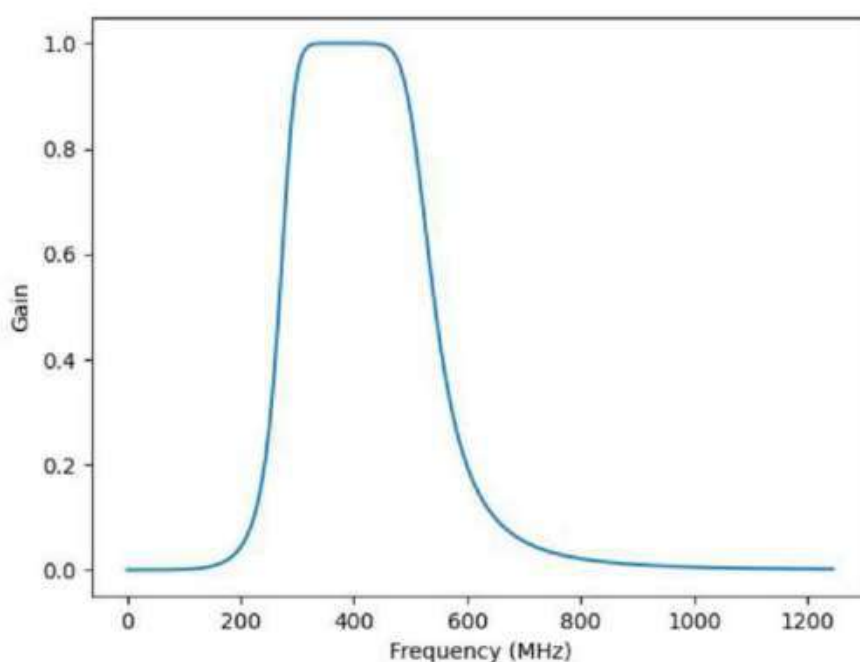


Рисунок 2.11 - Амплитудно-частотная характеристик фильтра

Полосовой фильтр был разработан для сохранения частот в определенном диапазоне и удаления остальных. Частотный диапазон выбирался из среднего спектра радарограмм и фокусировался вблизи центральной частоты антенны (400 МГц). Профиль радарограммы отфильтровано полосовым фильтром

Баттерворта с полосой пропускания от 280 МГц до 520 МГц представлен на рисунке 11.

Параметры передаточной функция полосового БИХ фильтра Баттерворта 4 порядка:

SOS Matrix:

1 0 -1 1 -1.8661 0.8890

1 0 -1 1 -1.6426 0.7605

Scale Values: 0.1263, 0.1263

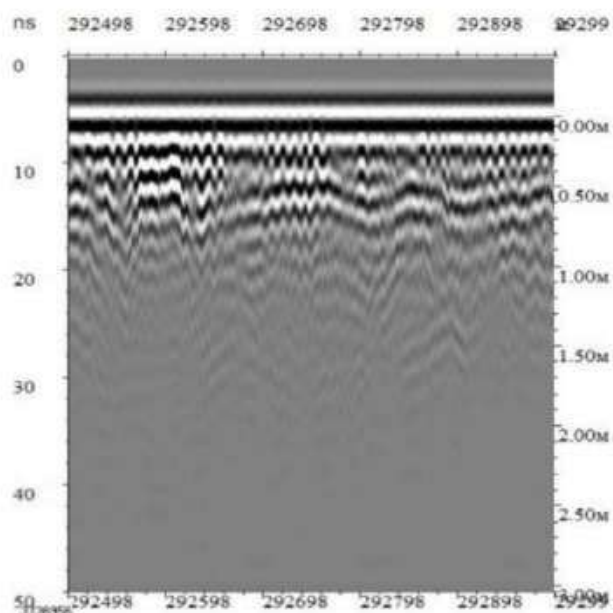


Рисунок 2.12 - Профиль радарограммы после фильтрации

Спектр выбранной трассы после фильтрации представлен на рисунке 2.13

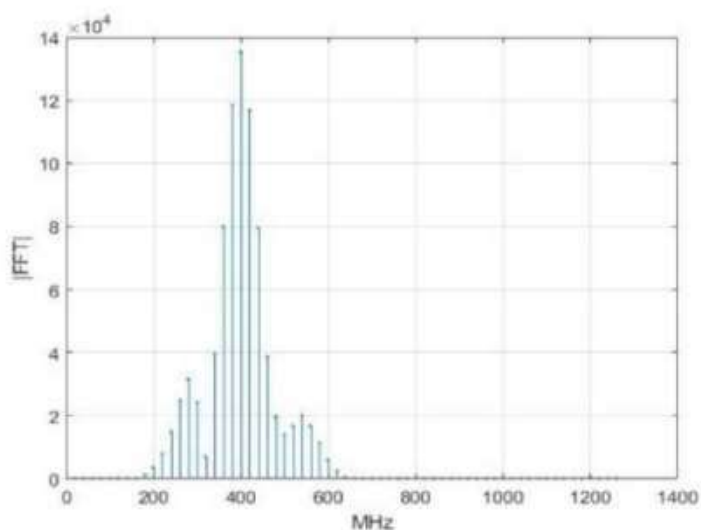


Рисунок 2.13 - Спектр трассы после фильтрации

Полосовая фильтрация радарограммы антенного блока 1000МГц.

Передаточная функция полосового фильтра Баттерворта с полосой пропускания от 700 МГц до 1300 МГц был синтезирован в среде MatLab Filter Designer.

Амплитудно-частотная характеристик разработанного полосового БИХ фильтра Баттерворта представлен на рисунке 2.14.

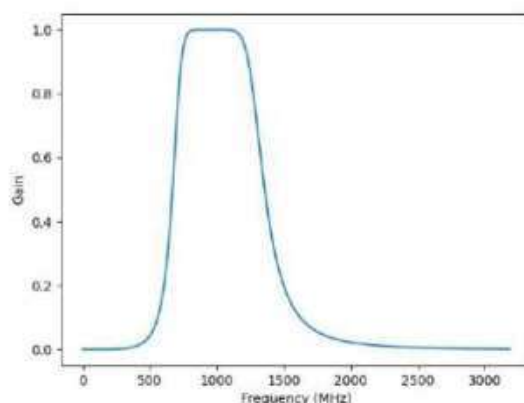


Рисунок 2.14 - Амплитудно-частотная характеристик фильтра

Частотный диапазон выбирался из среднего спектра радарограмм и фокусировался вблизи центральной частоты антенны (1 ГГц). Профиль радарограммы отфильтровано полосовым фильтром Баттерворта с полосой пропускания от 700 МГц до 1300 МГц представлен на рисунке 2.15.

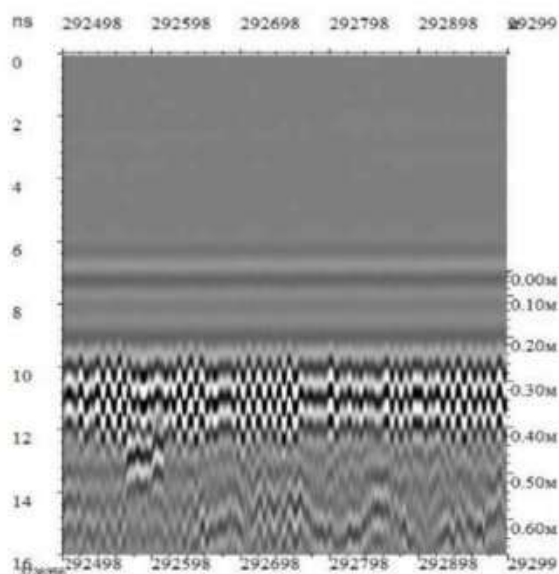


Рисунок 2.15 - Профиль после фильтрации

Спектр выбранной трассы после фильтрации полосовым фильтром Баттерворта представлен на рисунке 2.16. Параметры передаточной функций полосового БИХ фильтра Баттерворта 4 порядка:

SOS Matrix:

1 0 -1 1 -1.7460 0.8174. 1 0 -1 1 -1.8991 0.9139

Scale Values: 0.09619, 0.09619

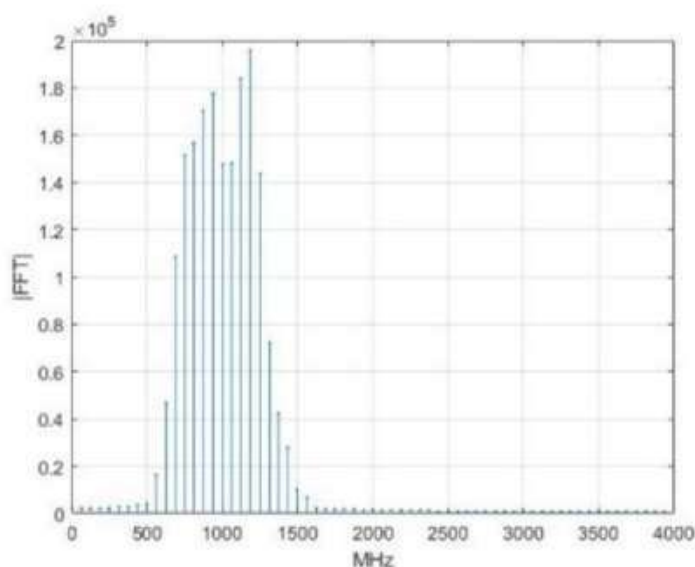


Рисунок 2.16 - Спектр трассы после фильтрации

Интерпретация результатов георадиолокационных исследований дорожного покрытия – сложный и трудоемкий процесс, требующий большого опыта и знаний, а также по возможности проверки результатов другими методами исследований. Основные приемы обработки направлены на подавление, ослабление или удаление бесполезной информации и выделение, усиление полезной. Частотная фильтрация трассы радарограммы выполняется с целью увеличения отношения сигнал/помеха путем избирательного удаления помех переотражения в спектре трассы. Проведена предварительная обработка радарограммы дорожного покрытия для удаления бесполезной и выделения полезной информации.

Проведена фильтрация трассы радарограммы полосовым БИХ фильтром Баттерворта для избирательного удаления помех переотражения в спектре трассы. Уменьшения шума в радарограмме повышает качества исследования дорожной одежды.

2.5. Примеры применения фильтрации на реальных данных

Цель обработки заключалась в подавлении низкочастотных шумов, устранении посторонних помех и выделении отражённых сигналов, соответствующих границам слоёв дорожной одежды. На рисунке 1 представлен исходный профиль радарограммы протяжённостью 500 метров, полученный без применения усиления.

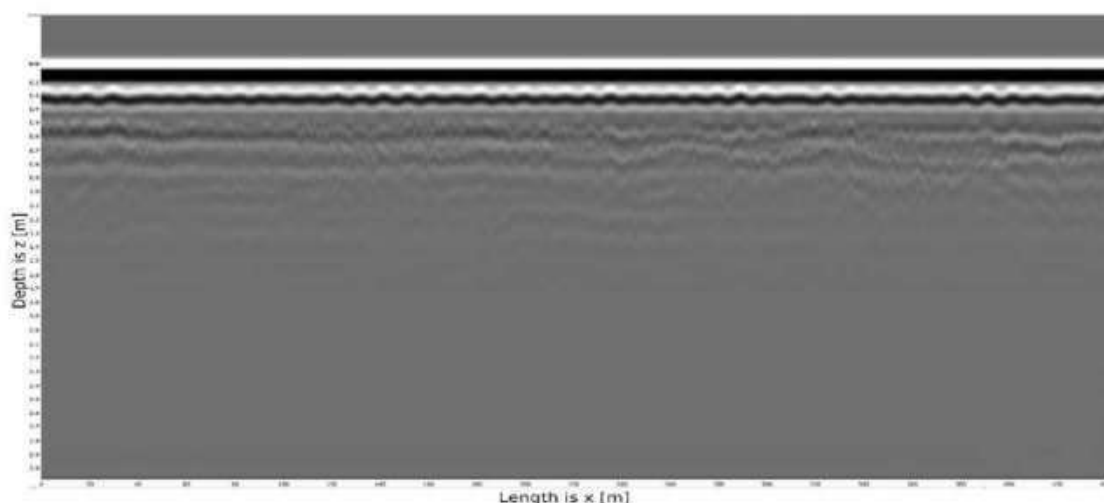


Рисунок 2.17 - Геоэлектрический разрез подземной среды, полученный прибором серии “ОКО-2”

На рисунке 2.17 вертикальная ось Oz является глубиной дорожной одежды (на рисунке 2.17 максимальная глубина проникновения сигнала 3 метра), а горизонтальная ось Ox является длиной автодороги (на рисунке 2.17 максимальная длина исследуемой дороги 500 метров). Также можно заметить на рисунке 1 черные, белые и серые цвета. Черные цвета соответствуют локальному максимуму, белые - локальному минимуму, а серые - соответствуют значениям, лежащим между локальными максимумом и минимумом.

Если с любой точки x_0 профиля радарограммы по оси Ox провести вертикальную линию, то мы получим 2D график, который имеет вид на рисунке 2.18 ниже.

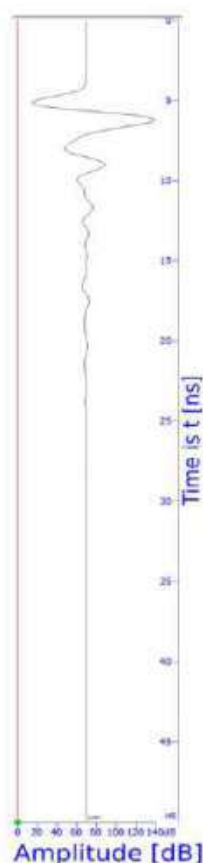


Рисунок 2.18 - Геоэлектрический разрез подземной среды в определенной точке x_0 по оси Ox .

2D график на рисунке 2.18 называется трассой. Рисунок 2.18 представляет из себя функцию (отклик среды), зависящую от времени, которая иллюстрирует поведение электромагнитного импульса при распространении в подземной среде. При этом значение модуля самой функции является амплитудой сигнала.

Расстояние между соседними трассами по оси Ox составляет 15 сантиметров. Совокупность всех трасс представляет из себя профиль радарограммы (рисунок 2.17). С учетом того, что длина дороги профиля радарограммы составляет 500 метров, количество трасс в профиле будет составлять приблизительно 3333.

Поскольку сигнал имеет частоту равной 400 МГц (низкочастотный сигнал), то сигнал слабо подвергается к изменению из-за шумов и помех. Поэтому нет необходимости в применении полосовой фильтрации (предназначен для очистки сигнала от шумов и помех).

Далее, применяем вычитание среднего, смысл которого является подсчет средней трассы среди всех трасс профиля и вычитание от каждой трассы среднего.

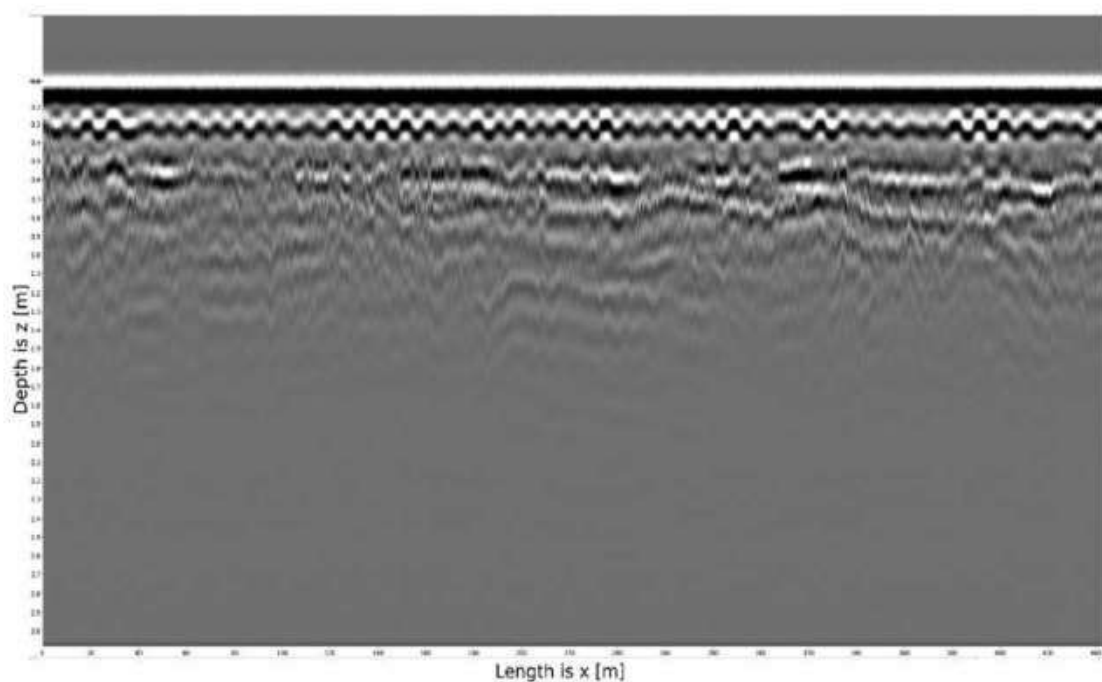


Рисунок 2.19 - Профиль радарограммы после применения вычитания среднего

Далее, применим автоматическое усиление, чтобы на глубине увидеть поведение сигнала, поскольку амплитуда сигнала затухает.

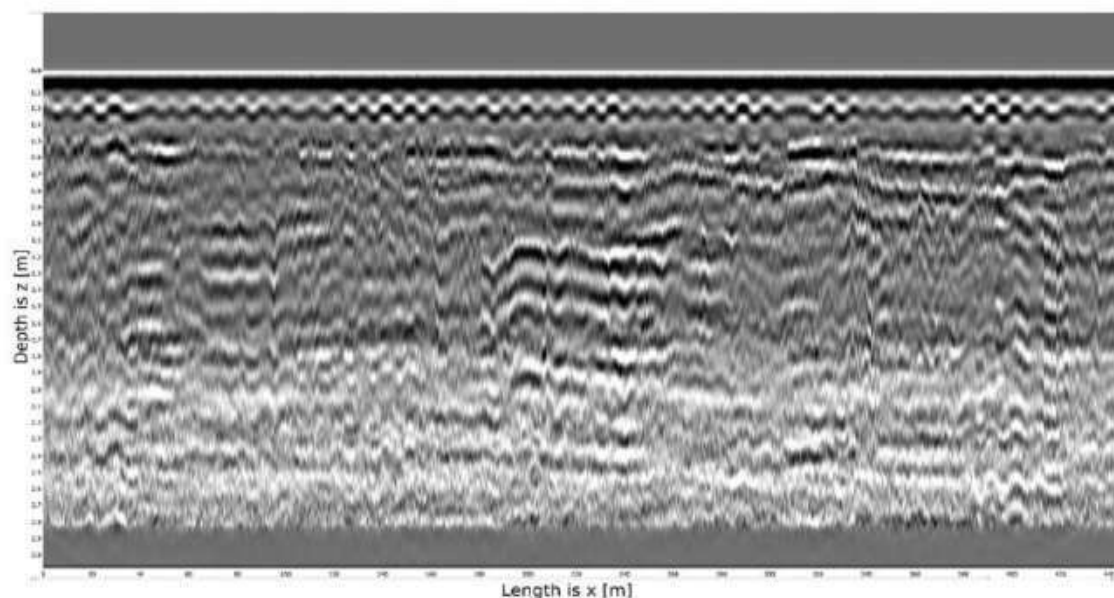


Рисунок 2.20 - Профиль после применения автоматического усиления

Следующим шагом будет выделение границ слоев дорожной одежды, который приведен ниже.

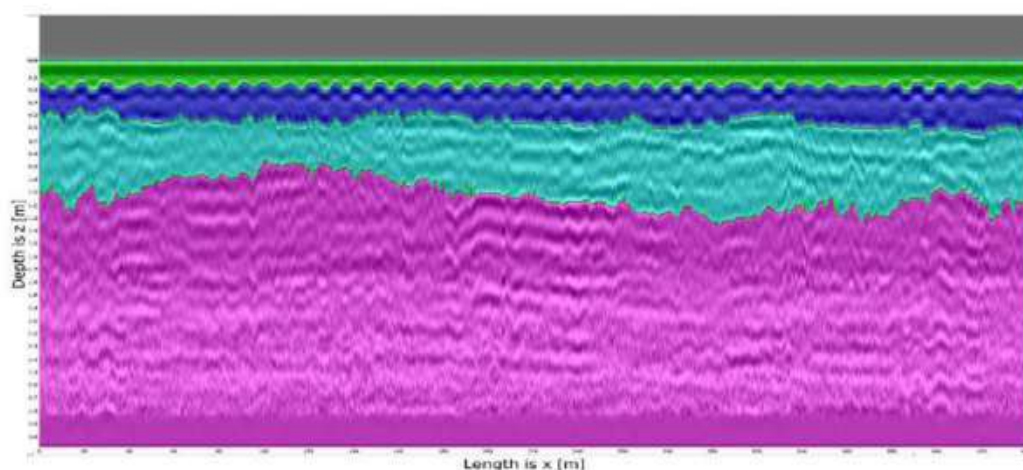


Рисунок 2.21 - Профиль после выделения границ слоев

Подробно о выделении границ слоев можно узнать в работе. Границы слоев определялись по белому цвету, то есть по локальному минимуму. Удалось восстановить границы только трех слоев, начиная с синего слоя до розового, где зеленый слой - воздух. Граница между третьим и четвертым слоем не виден из-за затухания сигнала.

Рассмотрим примеры хороших и плохих профилей. На рисунке 2.22 приведен пример плохого профиля, когда видно очертание вогнутого слоя.

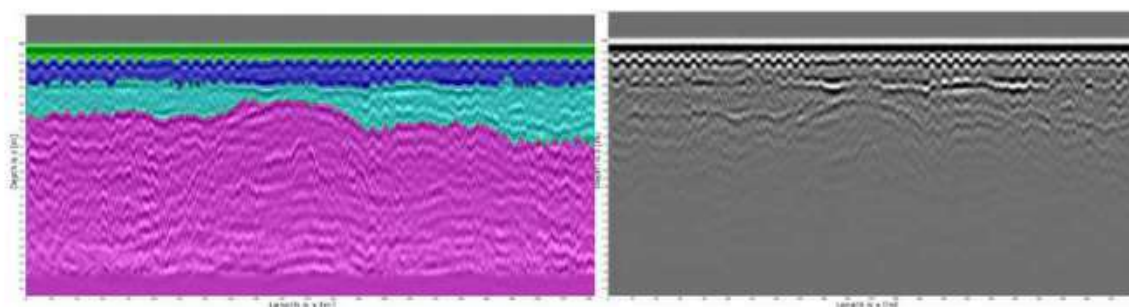


Рисунок 2.22 - Пример плохого профиля (вогнутый слой)

На рисунке 2.23 приведен пример плохого профиля, с очертанием выпуклого слоя, а на рисунке 2.24 – пример хорошего профиля.

Нужно учесть тот факт, что в программном обеспечении CartScan по умолчанию значения относительной диэлектрической проницаемости каждого слоя на рисунке 5 равна 5. По этой причине значение глубины z границ каждого слоя на рисунках 5-8 является неточным. Однако, мы можем сами задать априорные

данные толщины каждого слоя, тем самым можно будет толщину слоя сужать или расширять в профилях радарограммы.

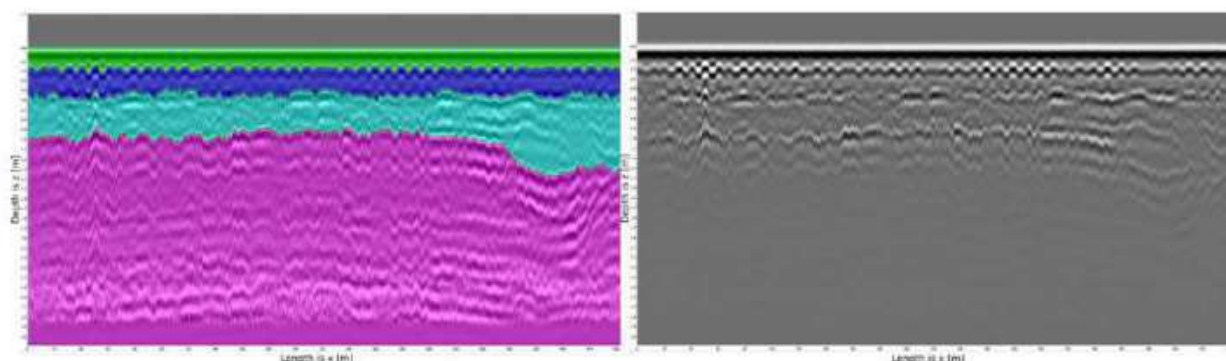


Рисунок 2.23 - Пример плохого профиля (выпуклый слой)

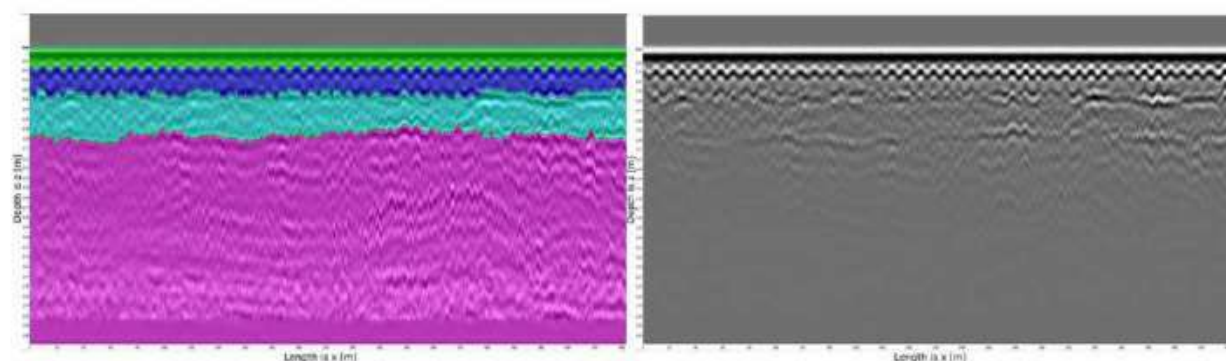


Рисунок 2.24 - Пример хорошего профиля

Согласно стандартам дорожной одежды верхний слой асфальта мелкозернистый с толщиной 0.07 м. Далее идет крупнозернистый слой асфальта бетона с толщиной 0.08 м. Затем слои щебня с фракцией 0.4 мм с толщиной 0.3 м и слой щебня с фракцией 0.8 мм с толщиной слоя 0.25 метра. И наконец подстилающий слой природного грунта.

Зная толщину каждого слоя, можно восстановить диэлектрическую проницаемость каждого слоя. Восстановление диэлектрической проницаемости при помощи толщины слоя называется инженерно-техническим методом.

Для получения более достоверных данных профиля, протяженностью 500 метров, необходимо извлечь пробу (произвести бурение) в некоторой точке x_0 автодороги, чтобы выяснить правдивость данных о толщине каждого слоя дорожной одежды.

3 МЕТОДЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

3.1 Обзор и анализ существующих методов радиолокационных исследований для реальных георадарных данных

Современные методы интерпретации и обработки георадиолокационных данных (GPR) играют ключевую роль в анализе подповерхностных структур. Эти методы позволяют извлекать полезную информацию из сложных сигналов, зарегистрированных радаром, и охватывают широкий спектр – от классических визуальных подходов до математически обоснованных численных моделей. Развитие вычислительной техники и алгоритмов обработки сигналов обеспечило значительный прогресс в точности, надежности и автоматизации интерпретации. К недостаткам существующих в настоящее время георадарных систем относятся: производительность георадаров ограничивается рассеянием сигнала в неоднородных условиях (например, суглинка, каменистые почвы); интерпретация радарограмм, как правило, неинтуитивна для новичка; для эффективного проектирования, проведения и интерпретации георадарных съемок необходим значительный опыт.

Главной задачей интерпретации радарограмм является определение геофизического разреза среды, по данным наблюдения в точках измерений. Для решения перечисленных проблем используются алгоритмы на основе инженерно-технических методов, компьютерное и математическое моделирование. Одним из основных подходов изучения подповерхностной радиолокации являются инженерно-технические методы на основе экспериментальных исследований на реальных георадарных данных (объектах).

Традиционные методы интерпретации основаны на инженерно-технических алгоритмах, встроенных в программное обеспечение георадарных комплексов. Однако подобные алгоритмы, как правило, имеют закрытую архитектуру, что ограничивает возможности их анализа, модификации и адаптации под конкретные задачи.

В последние годы в области георадиолокации наблюдается значительный прогресс, обусловленный внедрением новейших методов обработки и интерпретации данных. Эти достижения связаны как с развитием теоретических подходов, так и с совершенствованием вычислительных алгоритмов, что значительно расширяет возможности георадиолокационных технологий.

Теоретические основы георадиолокационного зондирования были заложены в трудах ведущих учёных, таких как D.J. Daniels [40], а также специалистов из стран Восточной Европы и Центральной Азии — А.В. Старовойтова [41], П.Н. Александрова [42], М.Л. Влагова [43-44], А.И. Калашника [45].

Классические методы интерпретации георадиолокационных данных

Современные георадарные исследования базируются на принципах отражения и рассеяния электромагнитных волн в неоднородных средах. Для интерпретации полученных сигналов применяются различные методы, позволяющие восстановить структуру подповерхностных объектов. Наиболее распространены визуальные, гиперболические и амплитудные подходы, обеспечивающие первичный анализ данных.

Визуальная интерпретация является исходным методом анализа радарограмм, который используется для предварительного определения границ, дефектов и неоднородностей. Метод основан на качественном анализе формы, яркости и контрастности отражений. Он не требует специализированного программного обеспечения и может выполняться в полевых условиях оператором, что делает его удобным на этапе экспресс-оценки состояния объекта (Daniels D.J [40]; Annan A.P. [46]). Основным недостатком является субъективность результатов, зависящих от опыта интерпретатора.

Гиперболический анализ позволяет определять глубину и положение объектов, создающих точечные отражения. На радарограмме такие объекты формируют характерные гиперболические кривые, параметры которых определяются скоростью распространения электромагнитной волны в среде. Метод обеспечивает количественную оценку глубины, но чувствителен к шумам и требует предварительной калибровки скоростей [47].

Амплитудный анализ основан на измерении и сравнении интенсивности отражённых сигналов. Он позволяет оценивать изменение электрофизических параметров среды — влажности, плотности и диэлектрической проницаемости [43, 44]. В практических задачах используется дискретная обработка сигналов с нормировкой амплитуд и фильтрацией высокочастотных помех. Преимущество метода — возможность количественной оценки изменений в слоях дорожной одежды. Недостаток — зависимость точности от качества усиления и характеристик антенн.

Численные и математические методы интерпретации

Альтернативный подход предполагает строгую математическую постановку и решение коэффициентных обратных задач электродинамики. Такие методы направлены на восстановление распределения физических параметров среды (в частности, диэлектрической проницаемости) на основе анализа зарегистрированных данных о распространении электромагнитных волн. Математическое моделирование радиолокационных процессов является фундаментальной основой для построения устойчивых и достоверных алгоритмов интерпретации георадарных данных. Согласно классическим исследованиям А.Н. Тихонова [48-49], М.М. Лаврентьева [50-51] и В.Г. Романова [52-54], решение обратных задач электродинамики требует применения специальных методов регуляризации и минимизации невязки между экспериментальными и теоретическими данными. В георадиолокации прямая задача заключается в моделировании распространения электромагнитных волн в среде с известными параметрами, тогда как обратная задача направлена на восстановление этих параметров (диэлектрической проницаемости ϵ и электропроводности σ) по зарегистрированным отражениям. Такое разделение обеспечивает физическую обоснованность вычислительных процедур и возможность перехода от экспериментальных измерений к реконструкции структуры исследуемой среды. В монографии В.Г. Романова изложен общий подход к исследованию динамических обратных задач для полной системы уравнений Максвелла. Алгоритмы решения обратных коэффициентных задач для уравнения геоэлектрики подробно рассмотрены в работах В.Г. Романова, С.И. Кабанихина и К.Т. Искакова [56-60]. Применение оптимизационного метода решения таких задач впервые представлено в работе

Кабанихина С.И. и Исакова К.Т [58] оптимизационные подходы для уравнений геоэлектрики в волновом и квазистационарном приближениях с учётом влияния воздуха развиты в исследованиях [57-59].

Важным направлением исследований является разработка численных алгоритмов решения рассматриваемой обратной задачи на дискретном уровне. В этом случае сопряжённая задача согласовано с прямой задачей.

Другими словами, при таком подходе мы получаем разностную схему обладающая свойством консервативности, то есть сохранения закона энергии на разностном уровне. Эффективность такого подхода была продемонстрирована в работах Б. Рысбайулы и соавторов [61-62], а также в исследовании А.Л. Карчевского [63], где представлен сравнительный анализ традиционного и дискретного подходов на численных примерах.

Среди отечественных разработок особое значение имеют работы, посвящённые алгоритмам первичной обработки георадарных данных [59-60].

Практическая апробация алгоритмов численного решения обратных задач электродинамики выполнена в исследованиях с применением приборов «Лоза-В» и «Зонд-12е». В этих работах предложены эффективные схемы дискретной аппроксимации и алгоритмы обработки реальных сигналов [59-60].

Таким образом, современные подходы к решению прямых и обратных задач геоэлектрики обеспечивают получение количественных характеристик слоёв и уточнение интерпретации экспериментальных данных. Однако их практическое применение ограничивается высокой вычислительной сложностью и требованием значительных ресурсов. В связи с этим актуальной научной задачей является разработка и оптимизация дискретных алгоритмов решения прямых и обратных задач, ориентированных на реализацию в высокопроизводительных вычислительных системах. Такие алгоритмы должны обеспечивать масштабируемость, параллельную обработку больших массивов георадарных данных и устойчивость вычислений при моделировании сложных многослойных структур.

Методы обработки георадиолокационных данных

Полосовая фильтрация применяется для удаления низкочастотных дрейфов и высокочастотных шумов, не несущих

информации о структуре среды.

В георадиолокации используются дискретные фильтры Баттерворта, Бесселя и Чебышева, реализуемые в частотной области.

Фильтрация улучшает соотношение сигнал/шум и повышает читаемость отражений, однако чрезмерное сужение полосы может привести к потере полезных компонент.

Фурье-фильтрация основана на преобразовании сигнала из временной области в частотную. Дискретное быстрое преобразование Фурье (FFT) используется для выделения информативных диапазонов и спектральных признаков границ.

Данный метод обеспечивает высокую вычислительную эффективность ($O(n \log n)$) и служит базовым инструментом для анализа периодических и стационарных компонент сигнала. Ограничением является отсутствие временной локализации отражений, что снижает информативность при коротких импульсах.

Вейвлет-анализ обеспечивает многомасштабное разложение сигнала и позволяет выделять аномалии различного размера и глубины.

Дискретное вейвлет-преобразование (DWT) сохраняет локальную временную структуру и эффективно подавляет шумы при сохранении формы отражений.

Недостатком является зависимость результата от выбора базисной функции и параметров разложения.

Сравнительный анализ методов интерпретации и обработки георадарных данных

Классические методы интерпретации – простые в реализации, не требуют значительных вычислительных ресурсов:

Визуальная интерпретация базируется на субъективном анализе изображений. Её основное достоинство – простота применения. Однако результат сильно зависит от квалификации специалиста [40].

Гиперболический анализ позволяет оценить глубину и геометрию объектов на основе характерных гипербол на радарограммах. Требуется знание скорости распространения электромагнитных волн [64].

Амплитудный анализ применяется для выявления изменений в свойствах среды, но чувствителен к шумам [65].

Численные и математические методы – обеспечивают более высокую точность, но требуют существенных вычислительных ресурсов:

Методы решения прямых и обратных задач позволяют воссоздать структуру среды на основе уравнений электродинамики. Они имеют высокую точность, но сложны в реализации и требуют экспертной поддержки [66].

Комплексная методика интерпретации георадиолокационных данных

В рамках исследования была проанализирована методика интерпретации данных георадиолокации (GPR), предложенная А.В. Старовойтовым [41, 43]. Методика применяется для археологических, инженерно-геологических и стратиграфических задач, обеспечивая поэтапную расшифровку радарограмм. Выделяются четыре ключевых этапа:

Этап 1. Идентификация волн-помех. На первом этапе проводится распознавание и исключение ложных отражений:

- воздушные волны – отражения от наземных объектов (провода, деревья), проявляющиеся как гиперболы с очень высокой скоростью;
- кратные отражения – повторные сигналы от одной границы (например, от дна или плотного слоя), возникающие из-за переотражений;
- неполнократные отражения – сложные сигналы между близкими границами, часто диффузные или размытые;
- боковые волны – отражения от объектов вне трассы, часто с гиперболами, смещёнными от центра.

Корректное удаление этих помех – основа достоверной интерпретации, особенно в условиях плотной застройки, археологических памятников или инженерных объектов.

Этап 2. Выделение георадарных комплексов

Георадарный комплекс – участок разреза, соответствующий определённой геологической или культурной толще. Он выделяется по совокупности признаков:

- изменению характера волновой картины;
- наличию выраженных отражающих границ;
- различию в амплитудах и углах наклона осей синфазности.

Примеры комплексов:

- техногенные насыпи и отсыпки;
- культурные слои (в археологии);
- аллювиальные и делювиальные отложения;
- коренные породы или скальные основания.

Каждый комплекс требует последующей геологической привязки — сопоставления с результатами бурения, шурфования или стратиграфическими схемами.

Этап 3. Интерпретация георадарных фаций

Фации — структурные единицы внутри комплекса, отражающие специфические условия формирования среды.

Классификация производится по:

- геометрии осей синфазности (параллельные, наклонные, изогнутые);
- амплитуде отражений (яркие, слабые, хаотичные);
- частотному составу (высоко- или низкочастотные признаки);
- протяжённости отражений (непрерывные, фрагментарные).

Типы фаций:

- параллельно-слоистая (горизонтальные отложения);
- прозрачная (однородные или водонасыщенные среды);
- бугристая (неупорядоченные отложения);
- косослоистая (русла рек, насыпи);
- хаотичная (мусорные, разрушенные слои);
- смешанная (переходные обстановки).

Эти типы фаций визуализируются на радарограмме и дополняются спектральным и амплитудным анализом.

Этап 4. Построение глубинного разреза

Преобразование временных данных в глубинные осуществляется с учётом скоростей радиоволн в различных средах. Используются методы:

- подбор гипербола от точечных отражателей;
- контрольные измерения по известным объектам (например, уровню грунтовых вод);
- метод общих срединных точек (CMP) в инженерных условиях.

На итоговом разрезе отображаются:

- границы комплексов и фаций;
- предполагаемые литологии (песок, глина, культурный слой);

– инженерные или археологические объекты (фундаменты, пустоты).

Разрез верифицируется независимыми данными: бурением, раскопками, инженерной разведкой. Особое внимание уделяется корректной скорости, топографической коррекции и многопрофильному анализу.

Методика Старовойтова – комплексный подход к интерпретации GPR-данных, позволяющий пошагово перейти от «сырых» радарограмм к стратиграфической и инженерной модели среды. Каждый этап – от удаления помех до построения глубинного разреза – вносит вклад в достоверную расшифровку структуры подповерхностных объектов.

В рамках исследования разработана комплексная методика интерпретации георадиолокационных данных, ориентированная на диагностику многослойных неоднородных сред. Предложенный подход базируется на интеграции полевых экспериментальных измерений, численного моделирования процессов распространения электромагнитных волн в среде (решений прямых и обратных задач), а также инженерно-технических приемов. Методика обеспечивает улучшенную достоверность интерпретации данных за счёт взаимного согласования экспериментов и математических моделей, что особенно актуально при анализе сложных структур, таких как многослойные дорожные покрытия. Схема разработанной комплексной методики интерпретации георадиолокационных данных, ориентированная на диагностику многослойных неоднородных сред, с описанием этапов представлена на рисунке 3.1.

Этапы комбинированного метода интерпретации георадиолокационных данных для многослойных сред:

Предварительная обработка: первичная обработка данных, полученных с радара. Корректировка амплитуд сигналов, применение фильтрации, выравнивание усиления, а также устранение боковых, кратных и поверхностных волн, удаление шумов и другие процедуры, направленные на улучшение качества сигнала. Цель – повысить качество сигнала, повысить отношение сигнал/шум и выделить полезную информацию для последующего анализа.

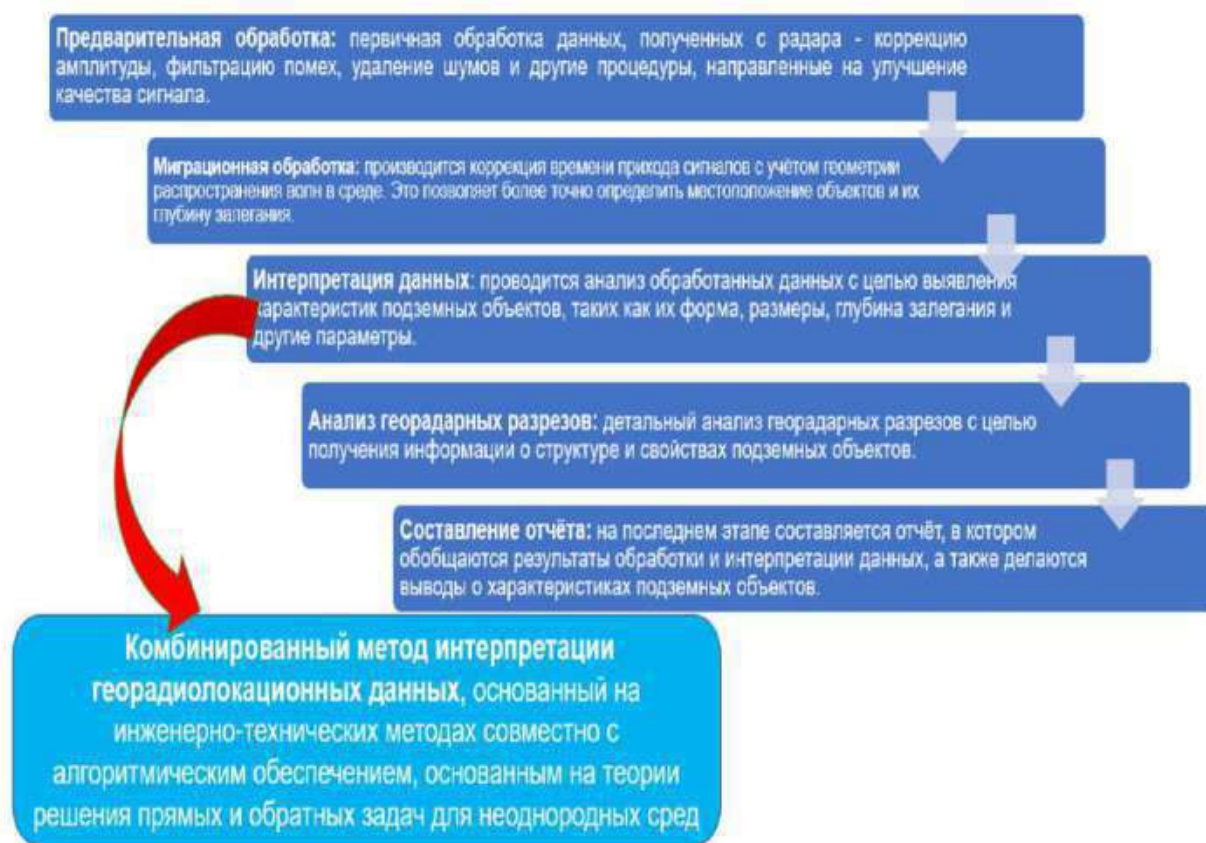


Рисунок 3.1 – Схема разработанной комплексной методики интерпретации георадиолокационных данных, ориентированная на диагностику многослойных неоднородных сред

Миграционная обработка: производится коррекция времени прихода сигналов с учётом геометрии распространения волн в среде. Это позволяет более точно определить местоположение объектов и их глубину залегания.

Интерпретация данных: проводится анализ обработанных данных с целью выявления характеристик подземных объектов, таких как их форма, размеры, глубина залегания и другие параметры. Интерпретация данных основана на инженерно-технических методах совместно с алгоритмическим обеспечением, основанным на теории решения обратных задач для неоднородных сред.

Анализ георадарных разрезов: построение глубинных и временных георадарных разрезов, формирование структурной модели. В результате формируется модель многослойной среды с геометрией и параметрами каждого слоя.

Составление отчёта: итоговый этап включает документирование результатов обработки, интерпретации и моделирования.

Комбинированный метод интерпретации георадиолокационных данных объединяет инженерно-технический подход с математическим моделированием (обратные задачи) и алгоритмической реализацией критериев согласия. Это особенно эффективно для сложных многослойных и неоднородных сред.

3.2 Дискретный алгоритм интерпретации для вертикально неоднородных сред

Для более строгого описания процессов распространения сигналов в неоднородной среде формулируются постановки прямой и обратной задач подповерхностной радиолокации. Прямая задача моделирует поведение электромагнитного поля в известных условиях, тогда как обратная задача ориентирована на восстановление неизвестных параметров среды, что имеет решающее значение для последующей интерпретации данных георадиолокации.

Физическая постановка одной из задач подповерхностной радиолокации заключается в следующем; на поверхности асфальта включается источник стороннего тока j^{cm} , имеющий по времени колоколо-образный вид $r(t)$. Там же на поверхности асфальта в течении примерно 50 наносекунд (длительность измерения зависит от частоты электромагнитного импульса, например, для 400 МГц это будет 50 нс, а для 1000 МГц это – 16 нс) измеряется электромагнитное поле (отклик среды), по которому требуется определить ε (или σ), либо одновременно ε , σ на глубине от нуля до 2,2 метра.

Рассмотрим постановку задачи:

$$\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E_2 + \sigma \frac{\partial}{\partial t} E_2 = \frac{1}{\mu} \Delta_{x_1 x_3} E_2 - p(x_1) q(x_3) r'(t) \quad (3.1)$$

$$E_2|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} E_2|_{t=0} = 0, \quad (3.2)$$

здесь: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{отн}$, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}$, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_{отн}$, $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{М}}$, $\mu_{отн} = 1$,
 $p(x_1) q(x_3)$ - функции, описывающие поперечные размеры источника.

Для исследования прямой задачи (3.1)-(3.2) выберем модель среды – вертикально неоднородной. Так как согласно стандарта дорожной модели рассмотрим четырехслойную среду. В точках раздела сред будем брать геофизические характеристики сред усредненными. Таким образом горизонтальные пунктирные линии $x_3^1 = 0.2\text{м}$, $x_3^2 = 1.2\text{м}$, $x_3^3 = 2.2\text{м}$ -соответствуют границам раздела сред между однородными средами (эти данные были взяты из стандарта дорожной одежды), в каждой из которых значения $\varepsilon_{отн}$ и σ - постоянны. В дальнейшем при расчетах мы будем рассматривать модель вертикально-неоднородной среды, в которых в точках границах сред значения геофизических свойств сред принимаем усредненными, что соответствует на практике.

Сведем задачу (3.1)-(3.2) к одномерной. Обозначим через оператор преобразования Фурье по переменной x_1 , перепишем (3.1) - (3.2) в виде:

$$\varepsilon U_{tt} + \sigma U_t = \frac{1}{\mu} (U_{x_3 x_3} - \lambda^2 U) - P_\lambda q(x_3) r'(t) \quad (3.3)$$

$$U|_{t=0} = 0, U_t|_{t=0} = 0, \quad (3.4)$$

Здесь: $U = F_{x_1} [E_2(x_1, x_3, t)]$, $P_\lambda = F_{x_1} [p(x_1)]$, λ - параметр преобразования Фурье по переменной x_1 .

Постановка прямой задачи: По известным значениям кусочно- постоянных функций $\varepsilon(x_3)$, $\sigma(x_3)$, и положительной постоянной μ определить функцию U как решение обобщенной задачи Коши из соотношений (3.3)-(3.4).

Пусть относительно решения прямой задачи (3.3)-(3.4) известна дополнительная информация в точке $x_3 = 0$, отклик среды:

$$U^\lambda(0, t) = f(t) \quad (3.5)$$

Постановка обратной задачи: По известным значениям $\sigma(x_3)$, μ и дополнительной информации (3.5) (где: $\lambda = \lambda_0$ - фиксированно) определить $\varepsilon(x_3), U^{\lambda_0}$ из соотношений (3.3) — (3.4).

Переход к безразмерным величинам

Запишем (3.3)-(3.4) в виде:

$$\varepsilon \mu U_{\eta_i} + \mu \sigma U_t = U_{x_3 x_3} - \lambda^2 U - \mu \theta, \quad x_3 \neq x_3^k, \quad (3.6)$$

$$U|_{t=0} = 0, U_t|_{t=0} = 0. \quad (3.7)$$

Здесь: $\vartheta = p_\lambda q(x_3) r'(t)$, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_{отн}$, $\mu = \mu_0 \mu_{отн}$ в котором постоянные μ_0, ε_0 - имеют значения:

$$\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{М}}, \quad \mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{М}}$$

Введем замену переменных $\tau = \beta t$, где: β - коэффициент обезразмеривания. Положим $\beta = 10^8$, и запишем задачу (3.6)-(3.7) в новых переменных (τ, x_3) ,

$$b U_{\tau\tau} + a U_\tau = U_{x_3 x_3} - \lambda^2 U - \gamma \bar{\vartheta}, \quad x_3 \neq x_3^k, \quad (3.8)$$

$$U|_{\tau=0} = 0, \quad U_\tau|_{\tau=0} = 0, \quad (3.9)$$

где:

$$b = c \cdot \varepsilon_{отн}, \quad a = \gamma \cdot \sigma_{отн}, \quad \gamma = 1,256 \cdot 100, \quad c = 8.854 \cdot 1.256 \cdot 0.01, \quad \bar{\vartheta} = p_\lambda q(x_3) r'(\tau)$$

Дискретные аналоги оптимизационного метода

Для практической реализации методов решения обратных задач необходимо переходить от непрерывных математических моделей к их дискретным аналогам. Это обусловлено требованиями к численной устойчивости, точности вычислений и возможностью реализации алгоритмов на ЭВМ. В этой связи разработаны дискретные схемы решения прямой и сопряжённой задач, обладающие необходимыми свойствами консервативности и устойчивости.

Для проведения численных расчетов мы ограничимся конечной областью $Q = [0, T] \times [0, L]$.

Рассмотрим обратную краевую задачу в волновой постановке, в котором будем находить приближенное значение ε . Приведем окончательные формулы:

Прямая задача:

$$\mu p U_{zz} + \mu \sigma U_t = U_{zz} - \lambda^2 U, \quad (3.10)$$

$$U|_{t=0} = 0, \quad U_t|_{t=0} = 0 \quad (3.11)$$

$$U_z|_{z=0} = \mu g(t), \quad U|_{z=L} = 0, \quad (3.12)$$

где $p(z)$ - приближенное решение ε обратной задачи, а функция $g(t)$ - функция Гаусса с параметром α :

$$g(t) = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} e^{-(\alpha t)^2}. \quad (3.13)$$

Квадратичный функционал:

$$J[p] = \int_0^T [U(0, t; p) - f(t)]^2 dt. \quad (3.14)$$

Градиент функционала:

$$\nabla J[p^{(n)}] = \mu \int_0^T U_{tt}(z, t; p^{(n)}) \cdot \psi(z, t; p^{(n)}) dt, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

Сопряженная задача:

$$\mu p \psi_{tt} - \mu \sigma \psi_t = \psi_{zz} - \lambda^2 \psi, \quad (3.16)$$

$$\psi|_{t=T} = 0, \quad \psi_t|_{t=T} = 0, \quad (3.17)$$

$$\psi_z|_{z=0} = 2[V(0, t; q) - f(t)], \quad \psi|_{z=L} = 0. \quad (3.18)$$

Для дискретизации формул прямой (3.10)-(3.12) и сопряженной (3.16)-(3.18) задач нами было использовано неявные разностные схемы, которые являются абсолютно устойчивыми. При использовании явной схемы, необходимо использовать условие Куранта.

Получим формулы прямой (3.10)-(3.12) и сопряженной (3.16)-(3.18) задач на дискретном уровне.

Для этого поступим следующим образом:

а) Область непрерывного изменения аргументов $Q = [0, T] \times [0, L]$ заменим сеточной

$$\Omega_h = \left\{ (i, h, t_k), i = \underline{0}, \underline{N}, k = \underline{0}, \underline{M}, h = \frac{L}{N}, \tau_k = t_k - t_{k-1}, k = \underline{1}, \underline{M} \right\},$$

неравномерная сетка по t вычисляется следующим образом:

$$t(q) = \begin{cases} \frac{C\eta q}{\xi - q}, & 0 \leq q \leq q_0, \\ \frac{(T - C\eta^{1-\beta})(q - 1)}{1 - q_0} + T, & q_0 \leq q \leq 1, \end{cases}$$

где $0 < \beta \leq 0.5$, $0 < C < 1$, $\xi = q_0(1 + \eta^\beta)$, $\eta = \frac{1}{\alpha^2}$.

Аппроксимируем прямую задачу (3.10)-(3.12) неявной разностной схемой:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu p_i}{\tau_k} \left(\frac{y_i^{k+1} - y_i^k}{\tau_{k+1}} - \frac{y_i^k - y_i^{k-1}}{\tau_k} \right) + \mu \sigma_i \frac{y_i^{k+1} - y_i^{k-1}}{2\tau_k} \\ & = \frac{y_{i+1}^{k+1} - y_i^{k+1} + y_{i-1}^{k+1}}{h^2} - \lambda^2 y_i^{k+1}, \\ & \quad k = \underline{1}, \underline{M-1}, i = \underline{1}, \underline{N-1}, \\ & \quad y_i^0 = 0, \quad y_i^1 = 0, \quad y_N^k = 0, \quad k = \underline{2}, \underline{M}, \\ & \quad y_1^{k+1} = y_0^{k+1} + h g^{k+1} + \\ & \quad + \frac{h^2}{2} \left(\frac{\mu p_0}{\tau_k} \left(\frac{y_0^{k+1} - y_0^k}{\tau_{k+1}} - \frac{y_0^k - y_0^{k-1}}{\tau_k} \right) + \mu q_0 \frac{y_0^{k+1} - y_0^{k-1}}{2\tau_k} + \lambda^2 y_0^{k+1} \right), \\ & \quad k = \underline{1}, \underline{M-1}. \end{aligned}$$

Дополнительная информация: $y_0^k \{p_i\} = f^k$, $k = \underline{2}, \underline{M}$.

Также аппроксимируем сопряженную задачу (3.16)-(3.18) неявной разностной схемой:

$$\begin{aligned} & \frac{\mu p_i}{\tau_k} \left(\frac{\varphi_i^{k+1} - \varphi_i^k}{\tau_{k+1}} - \frac{\varphi_i^k - \varphi_i^{k-1}}{\tau_k} \right) - \mu \sigma_i \frac{\varphi_i^{k+1} - \varphi_i^{k-1}}{2\tau_k} \\ & = \frac{\varphi_{i+1}^{k-1} - \varphi_i^{k-1} + \varphi_{i-1}^{k-1}}{h^2} - \lambda^2 \varphi_i^{k-1}, \quad k = \underline{M-1}, \underline{1}, i = \underline{1}, \underline{N-1}, \\ & \quad \varphi_i^M = 0, \quad \varphi_i^{M-1} = 0, \quad \varphi_N^k = 0, \quad k = \underline{M-2}, \underline{0} \\ & \quad \varphi_1^{k-1} = \varphi_0^{k-1} + h[y_0^{k-1} - g^{k-1}] + \\ & \quad + \frac{h^2}{2} \left(\frac{\mu p_0}{\tau_k} \left(\frac{\varphi_0^{k+1} - \varphi_0^k}{\tau_{k+1}} - \frac{\varphi_0^k - \varphi_0^{k-1}}{\tau_k} \right) - \mu \sigma_0 \frac{\varphi_0^{k-1} - \varphi_0^{k-1}}{2\tau_k} + \lambda^2 \varphi_0^{k-1} \right), \quad k \\ & \quad = \underline{M-1}, \underline{1}. \end{aligned}$$

б) Рассмотрим дискретный аналог функционала (3.14) и его градиента (3.15), например следующего вида:

$$J[p] = \sum_{k=1}^{M-1} [y_0^k\{p_i\} - f^k]^2 \tau_k, \quad (27)$$

$$\nabla J[p_i] = \mu \sum_{k=1}^{M-1} y_i^k\{p_i\} \left(\frac{\varphi_i^{k+1} - \varphi_i^k}{\tau_{k+1}} - \frac{\varphi_i^k - \varphi_i^{k-1}}{\tau_k} \right), \quad i = \underline{1, N-1}.$$

При выводе этих формул мы учли то обстоятельство, что полученные разностные схемы обладали свойством консервативности, то есть сохранения закона энергии на разностном уровне.

Для минимизации функционала применяем метод сопряженных градиентов, который является наиболее приемлимым при практических по аналогии.

Разработанные численные алгоритмы были протестированы на реальных примерах структуры дорожной одежды. В ходе расчетов были исследованы особенности восстановления диэлектрической проницаемости различных слоёв среды и проведена оценка точности восстановленных параметров.

Рассмотрена модель среды, соответствующему дорожному покрытию: 1-ый слой – асфальт (мелкозернистый и крупнозернистый) и прослойка из стеклосетки, 2-ий слой – подушка из смеси мелкой щебенки с фракцией 0.4 и 7% цемента, 3-ий слой – подушка из смеси крупной щебенки с фракцией 0.8, 4 слой - подстилающий слой – грунт (суглинка). Таблица 3.1 – представляет модель дорожной одежды.

Таблица 3.1. – Модель дорожной одежды

Номер слоя	1	2	3	Подстилающий слой
	3.0	6.0	4.0	20.0
σ (См/м)	0.00512	0.00725	0.00592	0.0132
z_k (м)	0.15	0.45	0.70	2.20

В таблице 3.1 указаны свойства среды, согласованные со специалистами в области центра качества дорожных активов. С

учетом того, что постановка задачи было получено из системы уравнений Максвелла в волновой постановке, возникает такое физическое явление как скин-эффект. По этой причине, сигнал может затухнуть, не дойдя до подстилающего слоя. Определим на какой глубине возникает скин-эффект. Для этого воспользуемся следующей формулой

$$H_s = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega_0 \sigma}}$$

где опорная круговая частота ω_0 равна $\frac{\sigma}{(\varepsilon \varepsilon_0)}$. Для вычисления глубины возникновения скин-эффекта выберем диэлектрическую проницаемость ε и удельную проводимость σ подстилающего слоя. В результате получим, что $H_s = 1.27\text{м}$.

Графики источника, отклика среды (3.2), а также решения задачи (3.3) в волновой постановке будут иметь следующий вид ниже.

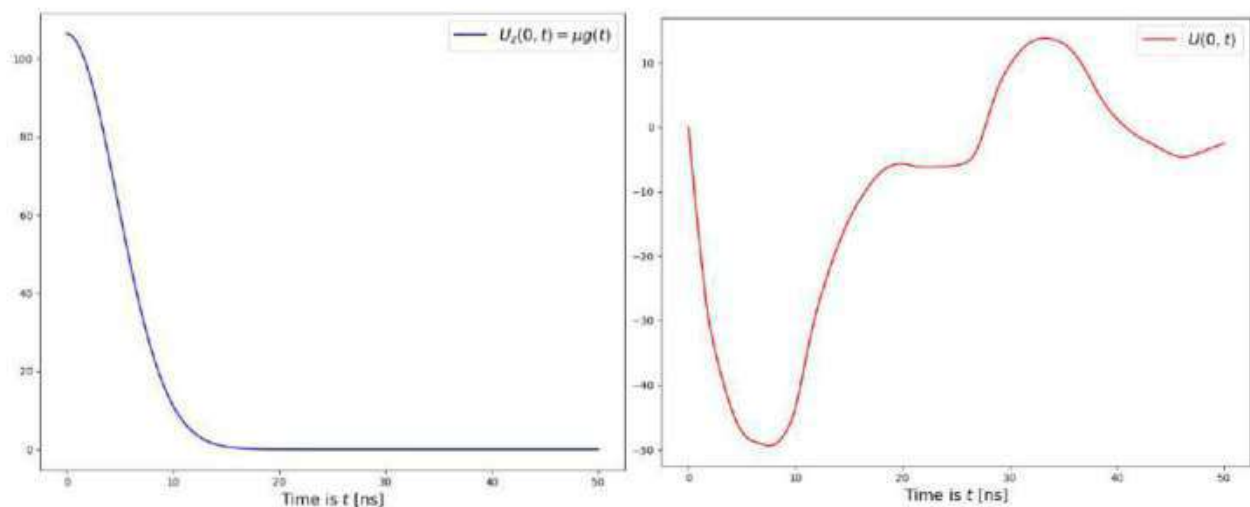


Рисунок 3.2 - Источник и отклик среды в волновой постановке

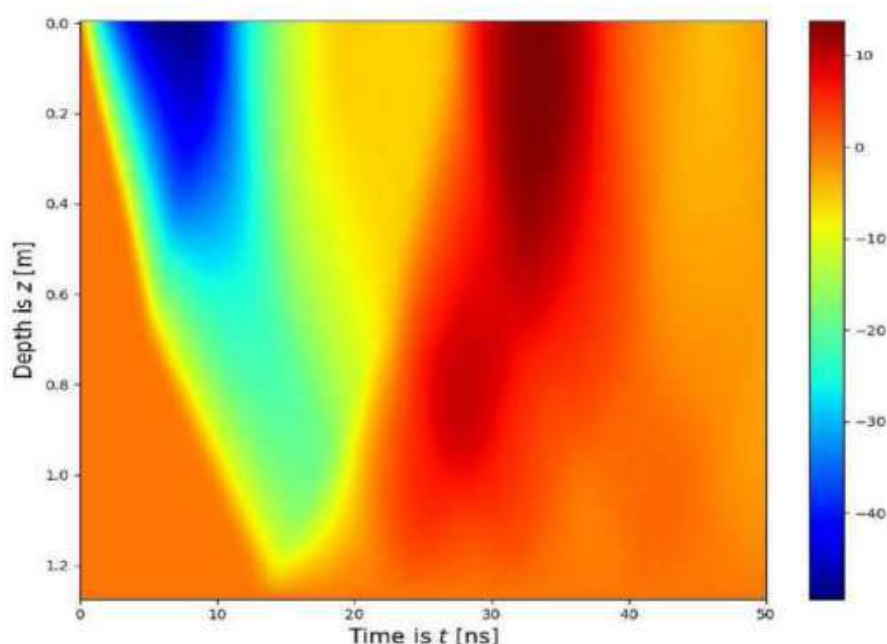


Рисунок 3.3 - Решение задачи в волновой постановке

В случае волновой постановки будем восстанавливать все слои подземной среды. Удалось восстановить за 28 итераций с точностью до 10^{-4} квадратичного функционала, что является отличным результатом. Все начальные приближения относительной диэлектрической проницаемости были взяты равной 1. Начальное приближение было выбрано таким образом, чтобы она была минимальной и близкой к диэлектрической проницаемости первого слоя (асфальт). Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости представлены в таблице ниже.

Таблица 3.2. Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости

Номер слоя	1	2	3	Подстилающий слой
ϵ	3.0	6.0	4.0	20.0
p	2.99639	5.99996	3.99539	20.00647

При этом норма: $\|\epsilon(z) - p(z)\|_{L_2} = 5.52 \cdot 10^{-3}$.

Далее, снизу представлены графики приближенных и точных значений диэлектрической проницаемости и отклика среды в волновой постановке при разных количествах итераций, соответственно.

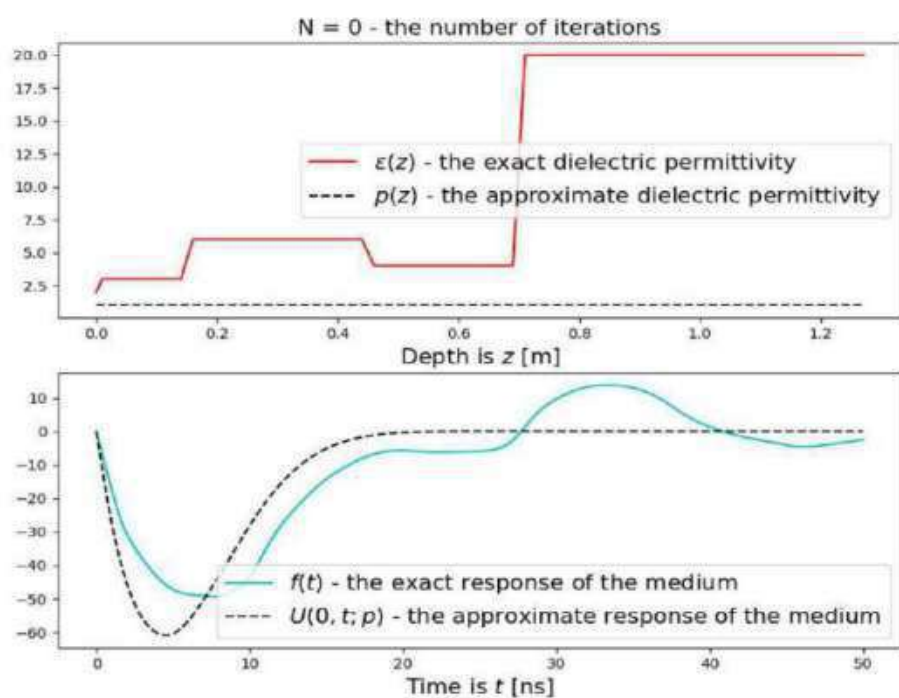


Рисунок 3.4 - Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости и отклика среды в волновой постановке при $n = 0$

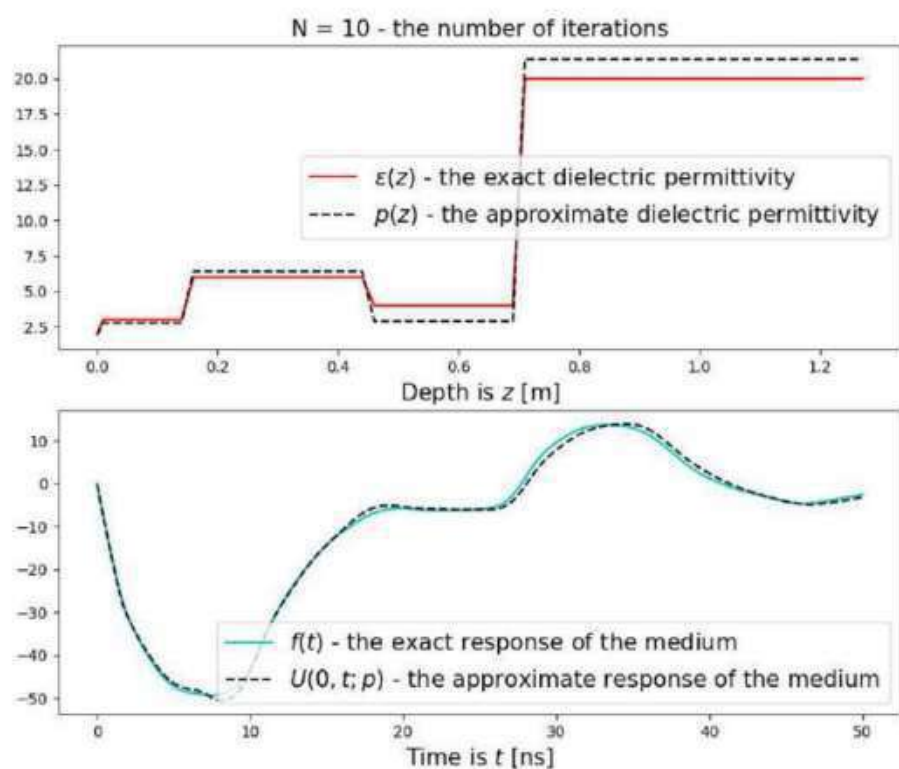


Рисунок 3.5 - Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости и отклика среды в волновой постановке при $n = 10$

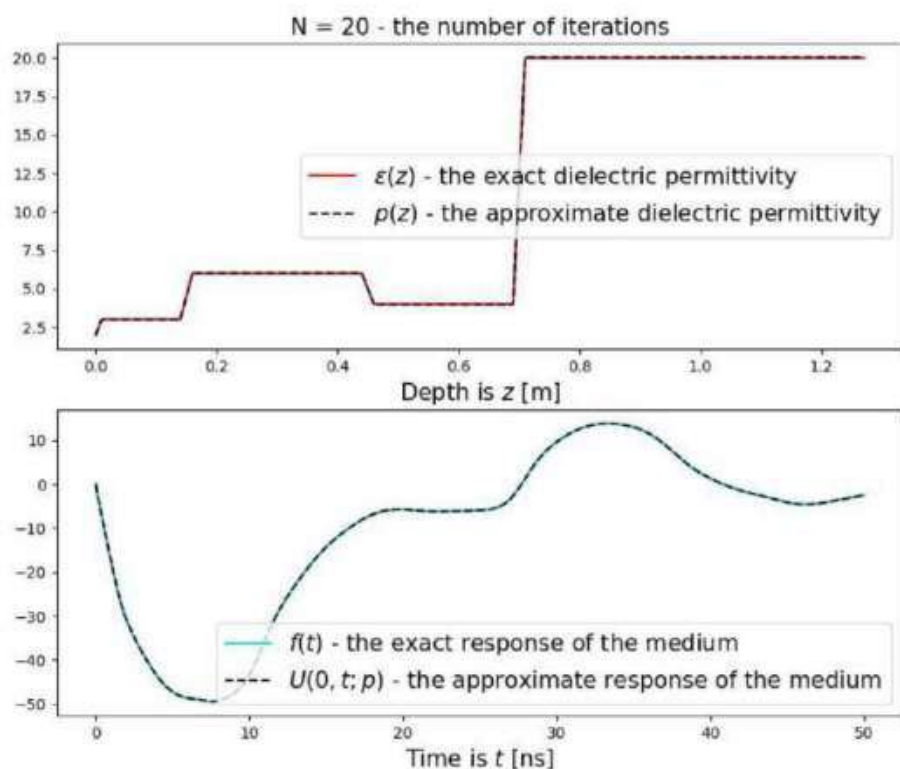


Рисунок 3.6 - Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости и отклика среды в волновой постановке при $n = 20$

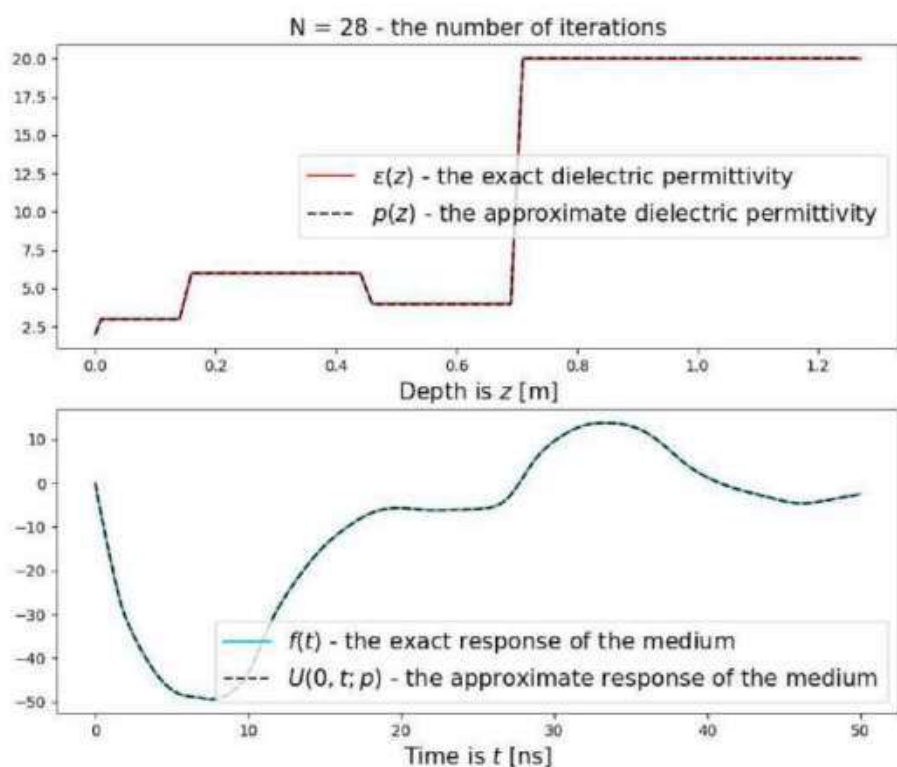


Рисунок 3.7 - Точные и приближенные значения диэлектрической проницаемости и отклика среды в волновой постановке при $n = 28$

3.3 Алгоритм определения источника в цифровом формате георадиолокационного прибора для различных антенных блоков

Зондирующий сигнал имеет форму 1.5 периода колебаний. Частота излучения импульсов - 10 КГц. Изменения центральной частоты зондирующего импульса происходит за счет подключения антенн разной длины. Общая длина антенн должна быть кратна $1/2$ длины волны в воздухе. Размах антенн при частоте 75 МГц составляет 2 метра ($\lambda = 4$ м.) а при частоте 150 МГц - 1 метр ($\lambda = 2$ м.). Стробирование 512 импульсов сигнала выполняется блоком управления и синхронизации.

Разработаны алгоритмы снижения шумов цифровыми фильтрами Баттерворта; с использованием различных вейвлетов: Хаара, Добеши. А также рассмотрены алгоритмы повышения разрешающей способности на основе дискретного уравнения Колмогорова-Винера, с применением алгоритма Левинсона-Дурбина и алгоритм очистки сигнала от посторонних частот с комплексным применением дискретного вейвлета и фильтра бесконечной импульсной характеристики (БИХ) нижних частот Баттерворта, на реальных данных георадара.

Суть обратной задачи состоит в определении коэффициента $\varepsilon(z)$ и $v(z, t; \varepsilon)$ из постановки прямой задачи по известной дополнительной информации. Обратную задачу решаем оптимизационным методом. Приведем окончательные формулы: Функционал:

$$J(p) = \int_0^T [v(0, t; \varepsilon) - f(t)]^2 dt,$$

где $p(z)$ - приближенное решение обратной задачи .

Градиент функционала:

$$\nabla J(p^{(k)}) = \int_0^T v_{tt}(z, t; p^{(n)}) \cdot \psi(z, t; p^{(n)}) dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

Сопряженная задача:

$$\begin{aligned}
p(z)\psi_{tt} - \sigma(z)\psi_t &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial}{\partial z} \psi \right) - \frac{\lambda^2}{\mu} \psi, \\
\psi_z|_{z=0} &= 2[v(0,t;p) - f], \quad \psi(L,t) = 0, \\
\psi|_{t=T} &= 0, \quad \psi_t|_{t=T} = 0.
\end{aligned} \tag{3}$$

Далее получим формулы на дискретном уровне. Для этого поступим следующим образом:

а) Область непрерывного изменения аргументов

$Q = [0, T] \times [0, L]$ заменим сеточной

$$\Omega_h = \{(i, h, \tau j), i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M}, h = L/N, \tau = T/M\}.$$

Аппроксимируем задачу разностной схемой:

$$p_i y_{\tau\tau} + \sigma_i y_\tau = \frac{1}{\mu} (y_{\bar{z},i})_{z,i} - \frac{1}{\mu} \lambda^2 y_i - g_i^j, \quad i = \overline{1, N-1}, \quad j = \overline{2, M}$$

$$y_i^0 = 0, \quad y_{\tau,i}^0 = 0, \quad y_0^j = y_1^j, \quad y_N^j = 0, \quad j = \overline{2, M}.$$

Дополнительная информация: $y_0^j\{p_i\} = f^j, \quad j = \overline{2, M}.$

б) Рассмотрим дискретный аналог функционала, например следующего вида:

$$J[p] = \tau \sum_{j=1}^M [y_0^j\{p_i\} - f^j]^2$$

$$\nabla J(p_i) = \tau \sum_{j=2}^{M-1} y_{\tau\tau}^j \phi_i^{j-1} + \frac{1}{\tau} \left(\frac{\phi_i^2 - \phi_i^1}{\tau} - \frac{\phi_i^1 - \phi_i^0}{\tau} \right) \cdot y_i^1.$$

Определение источника в цифровом формате для различных антенных блоков.

Значение модуля значений частотного сигнала $\vartheta(r_0, 0, \omega)$ представлено на рисунке 3.8.

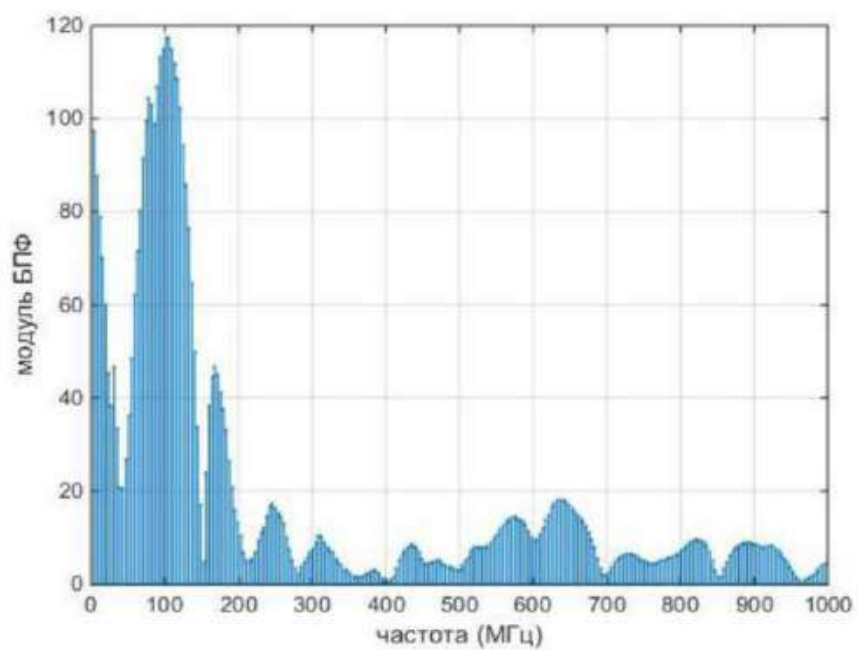


Рисунок 3.8 - Спектр трассы радарограммы, по данным эксперимента 1)(антенна расположена на расстоянии 1 метр)

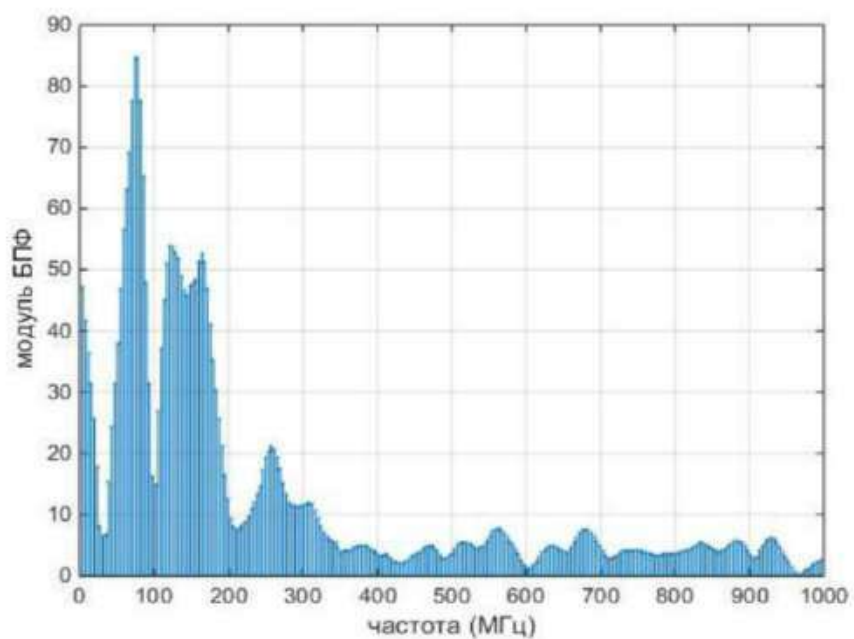


Рисунок 3.9 - Спектр трассы радарограммы, по данным эксперимента 2), (антенна расположена на расстоянии 2 метра)

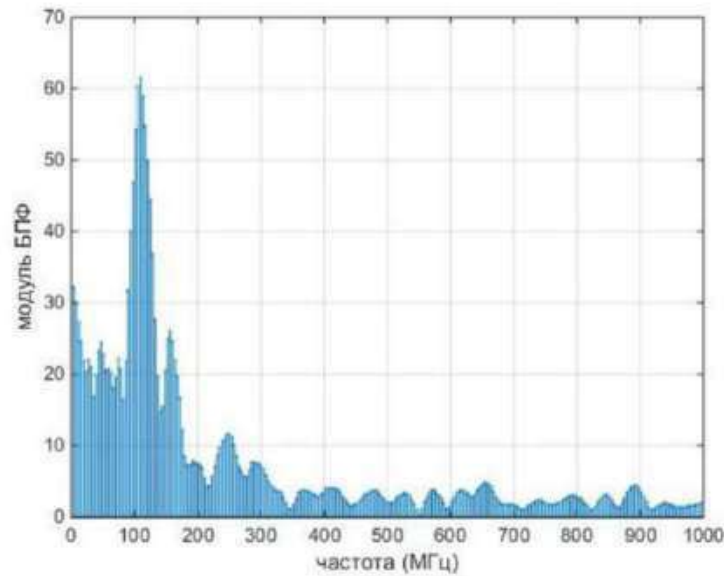


Рисунок 3.10 - Спектр радарограммы

Имея спектры трассы радарограмм, используем формулу

$$\vartheta(r_0, 0, \omega_i) = -\hat{g}(\omega_i) \int_0^{\infty} \frac{v J_0(v r_0)}{\sqrt{v^2 - (\omega_i^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i \omega_i \mu_0 \sigma_1)} + \sqrt{v^2 - \omega_i^2 \mu_0 \varepsilon_0}} dv, i = 1, \dots, n/2$$

Интеграл от комплексной функции в уравнении представим в виде:

$$\int_0^{\infty} \frac{v J_0(v r_0)}{\sqrt{v^2 - (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i \omega \mu_0 \sigma_1)} + \sqrt{v^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0}} dv = \int_0^{\infty} (p(v) + iq(v)) dv = \int_0^{\infty} f(v) dv$$

Численный расчет интеграла реализуется итерационным методом прямоугольников (или трапеции).

$$\int_0^{\infty} f(v) dv \approx h \sum_{j=0}^{\infty} f(v_j)$$

Суммирование производится с заданной точностью ε .

$$|f(v_j)| < \varepsilon$$

При расчете использовались следующие параметры:
 $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_1 = 5$, $\mu_0 = 1$, $r_0 = 1$, $\sigma_1 = 1/500$.

График спектра источника представлена на рисунке 3.11.

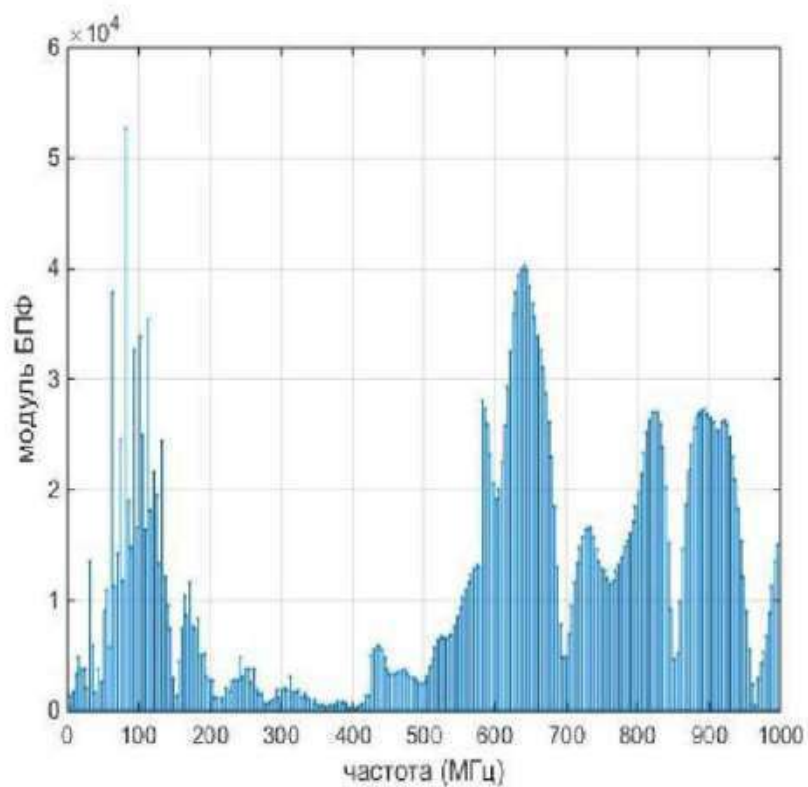


Рисунок 3.11 - График спектра источника сигнала, для эксперимента 1).
(Антенна расположена на расстоянии – 1 метр).

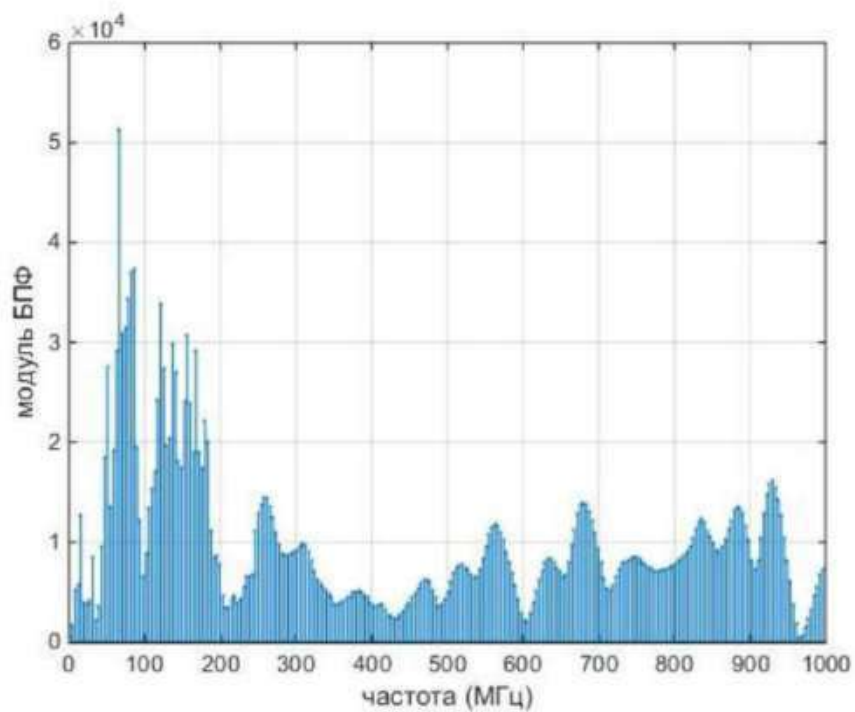


Рисунок 3.12 - Спектра источника сигнала, в случае расположения антенны
на -2 метра

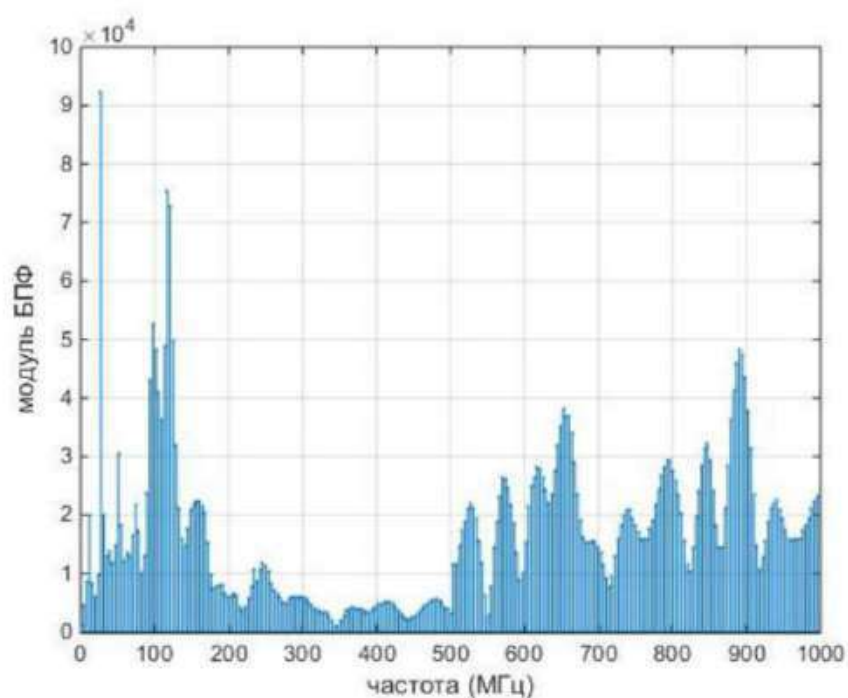


Рисунок 3.13 - График спектра источника сигнала

Обратным преобразованием Фурье спектра $g(\omega)$ находим абсолютный сигнал источника (комплексный). График действительной части сигнала источника, в случае эксперимента 1) представлен на рисунке 3.14.

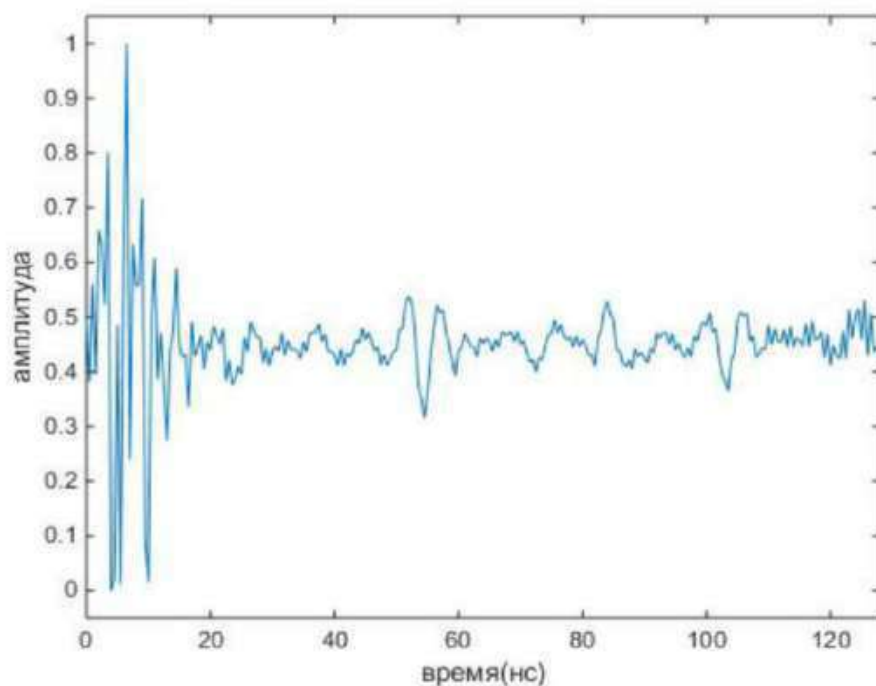


Рисунок 3.14 - График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента 1)

Ниже на рисунках 3.15 -3.16, приведены график восстановленного источника, при расположении антенны от источника на расстоянии: 2 метра, 3 метра.

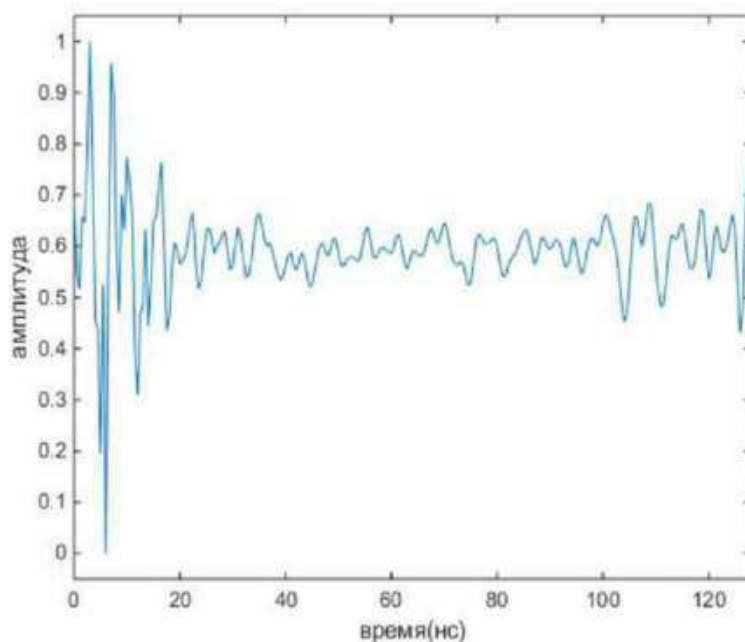


Рисунок 3.15 - График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента 2)

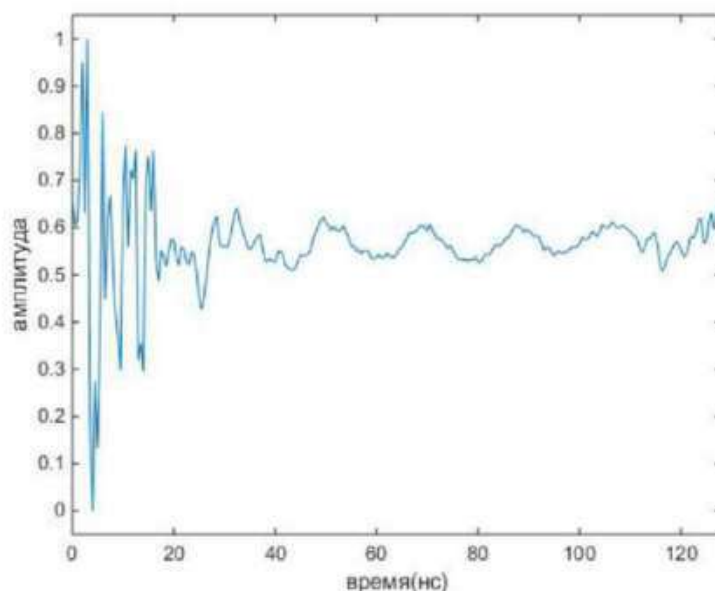


Рисунок 3.16 - График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента 3)

Вывод: как видно из полученных результатов расчета исходный сигнал передавшей антенны имеет широкий спектр и длительность зондирующего импульса составляет 0,5-10 нс.

3.4 Определение амплитудно-частотных характеристик георадиолокационных сигналов

Георадиолокационного обследования дорог включают в себя записи одиночных сигналов, полученных при каждом положении георадара с помощью приемной антенны. Обычно эти записи представляются в виде радарограммы, которая представляет собой набор сигналов (трасс), полученных во временном интервале от момента отправки зондирующего импульса до окончания записи.

В первую очередь, это необходимо для определения зависимости амплитуды сигнала от глубины его отражения в целях решения инженерных задач. Во-вторых, требуется устранение различных видов помех, которые могут затруднить обнаружение полезного сигнала. Спектральный анализ сигналов георадиолокации является одним из этапов предварительной обработки радарограммы.

Для проведения экспериментального исследования участка был осуществлен выезд на трассу «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба» автомобильным комплектом георадара «ОКО 2» с программно-измерительным комплексом «Дорога-ПРО».

На рисунке 3.17 изображена радарограмма полученная в точке наблюдения координаты GPS (широта 51.16.09.658, долгота 72.00.34.978, скорость передвижения авто 12 км/час, точка наблюдения по полотну трассы 0,166 км.). Построение радарограммы и графика спектра выполнены с помощью программы «Geoscan32».

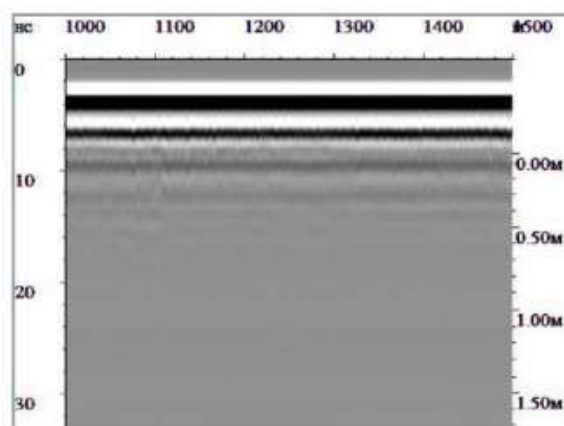


Рисунок 3.17 - Радарограмма в точке наблюдения GPS (51.16.09.658, долгота 72.00.34.978, скорость передвижения авто 12 км/час, точка наблюдения по полотну трассы 0,166 км)

На рисунке 3.18 приведена график 890 трассы радарограммы.

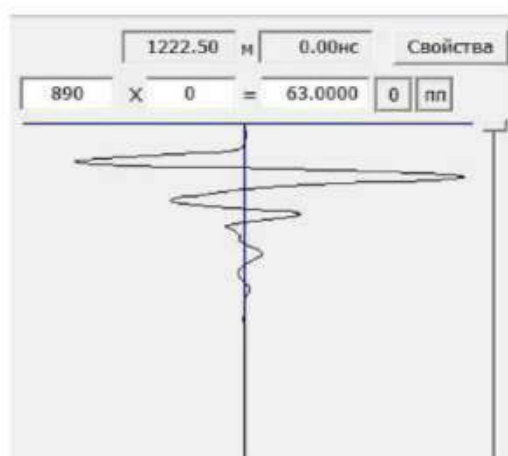


Рисунок 3.18 - График необработанной трассы радарограммы

Спектр радарограммы вычисляется дискретное преобразование Фурье, вычисляемое по формуле:

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{\frac{-j2\pi ik}{N}}$$

где x_i , $0 \leq i \leq N - 1$, оцифрованный сигнал трассы, j – комплексная единица. $N = 512$, количество отсчетов для каждой трассы георадара «ОКО 2».

Комплексные спектры вычисляются быстрым преобразованием Фурье. На рисунке 3.19 представлен спектр указанной трассы.

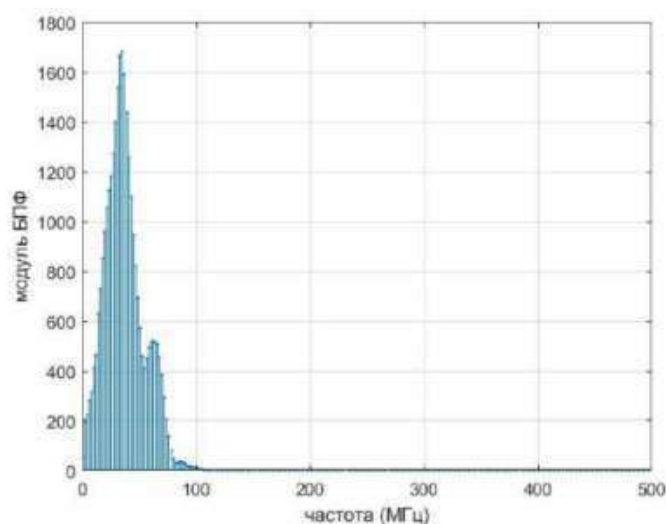


Рисунок 3.19 - Спектр трассы радарограммы

Для удаления постоянной составляющей сигнала и вычитания сигнала прямого прохождения, состоит в применении операции вычитания среднего значения. Результаты обработки радарограммы алгоритмом вычитание среднего представлены на рисунках 3.20 - 3.21.

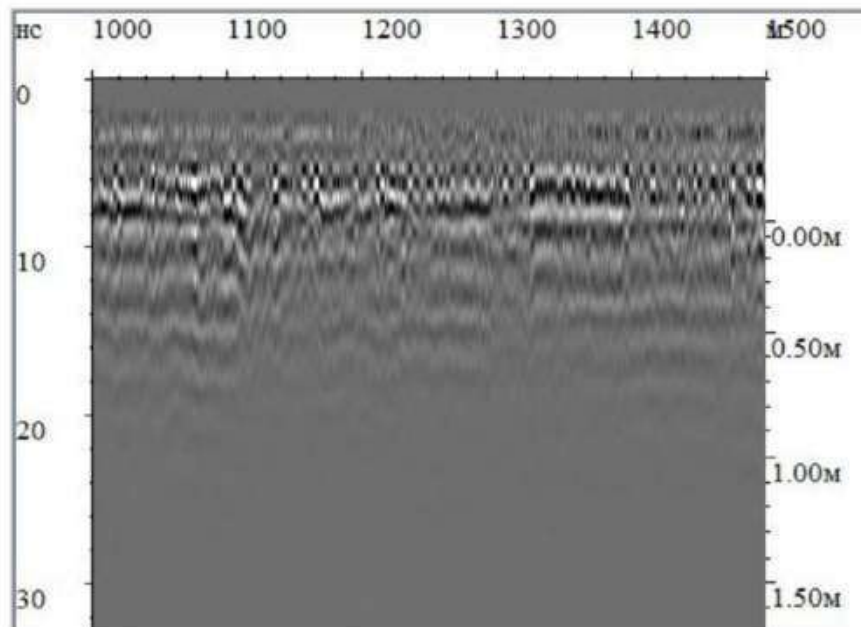


Рисунок 3.20 - Радарограмма после вычитания среднего.

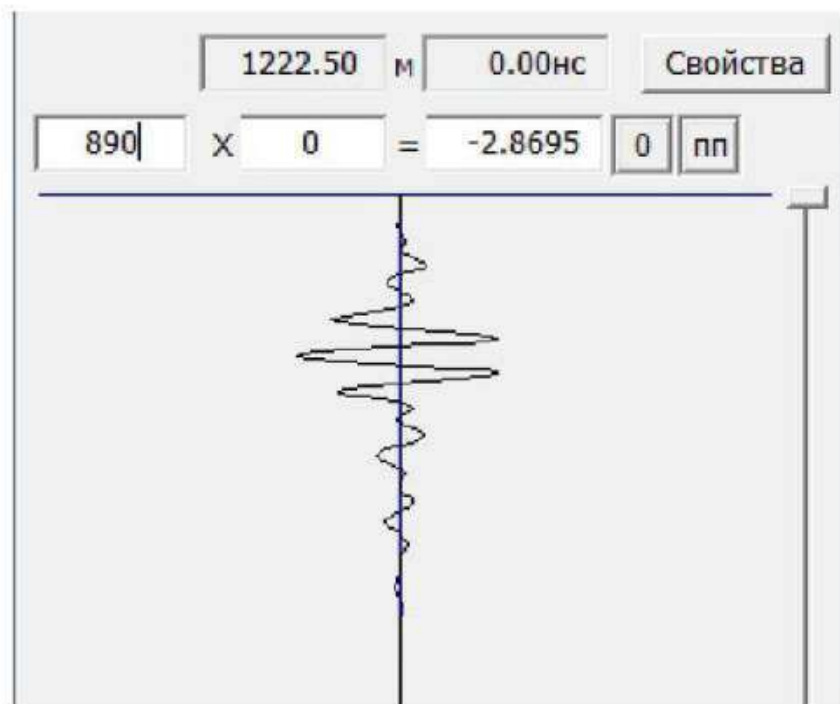


Рисунок 3.21 - График трассы после вычитания среднего

Измененные после вычитания среднего спектр трассы представлен на рисунке 3.22.

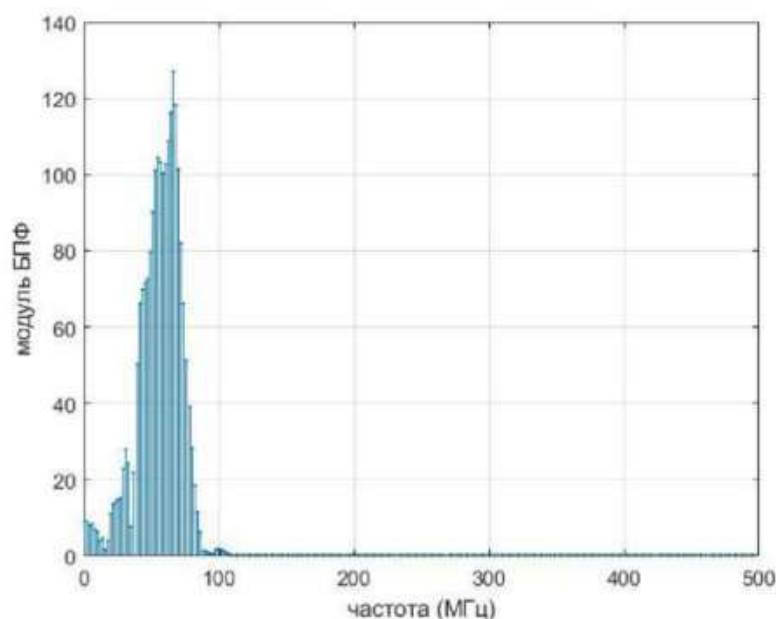


Рисунок 3.22 - Спектр трассы после вычитания среднего

Для снижения эффекта растекания спектра при выполнении дискретных преобразований Фурье часто используют оконные функции. В данном случае сигнал умножается на оконную функцию $w(k)$, которая должна уменьшать вклад сигнала на краях сегмента. Оконное преобразование Фурье вычисляется по следующей формуле:

$$X_w(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)w(k)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}.$$

В качестве функции $w(k)$ было выбрано окно Хэмминга.

$$w(k) = 0,54 - 0,46\cos\left(2\pi\frac{k-1}{N-1}\right).$$

В результате получили приведенную на рисунке 8 спектральный состав исследуемой трассы.

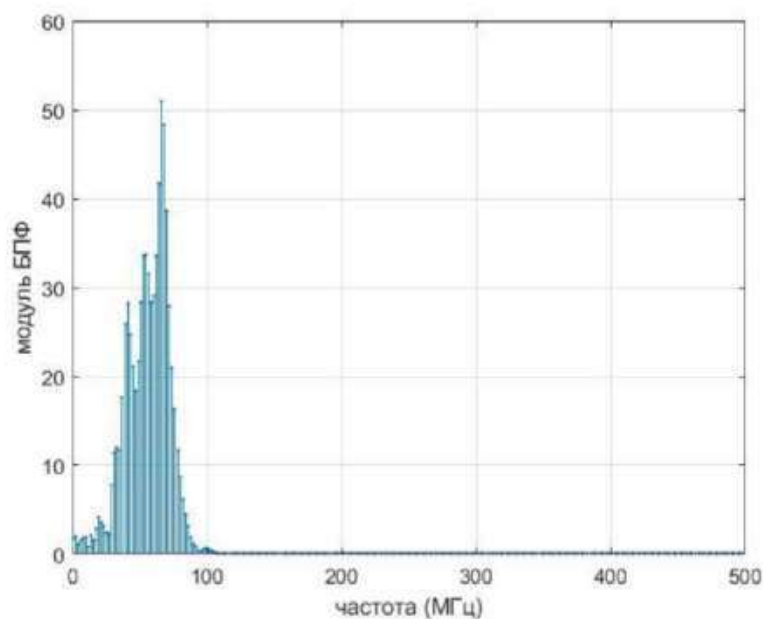


Рисунок 3.23 - Спектр трассы после оконных преобразований Хэмминга

Выявлено оптимальные параметры метода вычитания среднего в программе Geoscan32. Достигнута уменьшение спектров переотраженных дифракционных составляющих сигналов в трассе радарограммы вокруг центральной частоты. Полученные результаты будут использованы для генерации цифровых фильтров при окончательной очистке радарограммы от посторонних сигналов.

4 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ИНСТРУКЦИИ ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. Планирование обследований дорожных конструкций с применением георадара «ОКО-3»

4.1.1 Подготовительный этап

Подготовительный этап является ключевой составляющей комплекса работ по обследованию дорожных конструкций с использованием георадара «ОКО-3». Качество и полнота выполненных на данном этапе мероприятий непосредственно определяют достоверность последующих измерений и эффективность принятия инженерных решений. Подготовительные работы включают последовательную организацию информационных, технических и согласовательных процессов.

Сбор и анализ исходной информации о дороге.

Перед выездом на объект проводится тщательное изучение всех доступных материалов по трассе:

- проектно-конструкторская документация, содержащая данные о типах дорожной одежды, проектных толщинах слоев и конструктивных решениях;
- материалы предыдущих обследований (ГПР-съемок, дефектометрии FWD, визуальной диагностики), позволяющие оценить динамику изменений;
- архив ремонтных работ: сведения о капитальных и средних ремонтах, используемых материалах, годах выполнения, технологиях укладки;
- информация о дорожных условиях: климатические особенности региона, категории дороги, интенсивность движения, наличие инженерных коммуникаций.

Эти сведения позволяют сформировать предварительные гипотезы о возможных дефектах и оптимально спланировать режимы работы георадара.

Определение целей и задач обследования.

На подготовительном этапе формируется техническое задание, включающее конкретные цели диагностики. В зависимости от

состояния дороги и запросов заказчика обследование может быть ориентировано на:

- выявление внутренних дефектов дорожной конструкции (трещинообразование, зоны пустот, переувлажнение, разрушение основания);
- определение реальных толщин конструктивных слоев, включая асфальтобетон, основания и подстилающие слои;
- оценку однородности материалов, выявление зон с аномальной диэлектрической проницаемостью;
- контроль качества и приемку выполненных ремонтных работ;
- локализацию проблемных участков для последующей выкопки кернов или проведения дефлектограмм.

Корректно сформулированные цели позволяют выбрать соответствующий тип антенн, шаг трассировки, режим накопления и стратегию анализа данных.

Выбор участков обследования.

Определение зон обследования выполняется с учетом технического состояния дороги, бюджета, сроков и задач проекта. Возможны два подхода:

- Сплошное обследование всей трассы, обеспечивающее непрерывную картину состояния дорожной одежды по всей длине;
- Выборочные обследования проблемных отрезков, сформированных на основе ранее выявленных дефектов, данных подрядных организаций или визуального осмотра.

На этом этапе уточняются координаты начала и конца участков, протяженность профилей, требования к шагу съёмки и плотности трасс.

Согласование организационных вопросов.

Перед выездом на трассу осуществляются организационные мероприятия:

- согласование графика проведения работ с заказчиком, дорожными службами и подрядными организациями;
- получение разрешений на проведение работ в полосе отвода;
- обеспечение доступа техники, оптимальных условий движения, при необходимости — сопровождение машинами дорожной полиции;

- разработка плана обеспечения безопасности персонала и водителей с учетом особенностей участка;
- определение логистики: точки начала и окончания съемки, стоянки техники, заправка, маршруты подъезда.

Четкая организация взаимодействия всех участников позволяет избежать задержек, повысить оперативность работ и обеспечить безопасность на объекте.

4.1.2 Методическое обоснование

При планировании необходимо учитывать:

- нормативные требования Республики Казахстан и международные стандарты неразрушающего контроля;
- особенности климатических условий и сезонные факторы (замерзание, переувлажнение грунтов);
- технические возможности комплекса «ОКО-3» (частотный диапазон антенн 100–1200 МГц, глубина зондирования до 5–6 м в зависимости от среды).

Особое внимание уделяется выбору антенных блоков:

- низкочастотные (100–250 МГц) – для исследования основания и земляного полотна;
- среднечастотные (400–600 МГц) – для анализа слоев дорожной одежды;
- высокочастотные (900–1200 МГц) – для обследования верхних слоев покрытия и дефектов малой глубины.

4.1.3 Организация полевых работ

Схема движения: георадарное обследование осуществляется по полосам движения с фиксацией координат с помощью GPS.

Скорость движения: для «ОКО-3» оптимальна 30–40 км/ч при использовании автомобильной установки, либо 0,5–1 м/с при ручном перемещении антенны.

Плотность трасс: определяется задачами обследования – от 1 профиля через каждые 2–5 м (локальные дефекты) до 1 профиля через 25–50 м (сплошная диагностика).

Регистрация данных: проводится в цифровом формате с привязкой к времени и координатам, что позволяет формировать единую базу данных.

4.1.4 Обработка и интерпретация

На первом этапе выполняется первичная обработка сигналов: фильтрация помех, выравнивание нулевого уровня, коррекция скорости распространения электромагнитных волн.

Применяются алгоритмы:

- вейвлет-преобразование для выделения локальных аномалий;
- преобразование Гильберта для анализа огибающей сигнала и выделения энергии отражений;
- частотно-временной анализ для оценки амплитудно-частотных характеристик.

Итоговая интерпретация строится в виде:

- геоэлектрического разреза дорожной одежды;
- карт толщин и состояния конструктивных слоев;
- выявления зон переувлажнения, пустот, каверн и других дефектов.

4.1.5 Документирование и рекомендации

По результатам обследований формируется отчет, включающий:

- схемы трасс и профилей обследования;
- интерпретированные радарограммы и выделенные аномалии;
- таблицы толщин слоев и сопоставление с проектными значениями;
- методические рекомендации по ремонту или дальнейшему мониторингу.

4.2. Техническое обеспечение обследований и параметры зондирования

Георадарный комплекс серии «ОКО-3» разработан для проведения подповерхностных радиолокационных исследований и является одной из наиболее универсальных систем, применяемых при обследовании транспортных сооружений и дорожных конструкций. Система обеспечивает работу с широким спектром антенн и модулей, позволяя адаптировать методику обследования под конкретные инженерные задачи — от определения толщин

асфальтобетонных покрытий до диагностики состояния земляного полотна и подстилающих грунтов.

Комплекс отличается модульной архитектурой: центральный блок сбора данных соединяется с антенно-передающими модулями различных диапазонов, что обеспечивает универсальность применения. «ОКО-3» поддерживает работу как в полевых, так и в лабораторных условиях, может эксплуатироваться при различных климатических факторах (от -20 до $+50$ °C) и обладает высокой устойчивостью к вибрационным нагрузкам при передвижении на автомобильных тележках.

Основные компоненты комплекса. Стандартный комплект «ОКО-3» включает:

- Блок управления и регистрации данных (электронный модуль, соединяющийся с ПК или ноутбуком через USB/ETHERNET).
- Антенные блоки (низко-, средне- и высокочастотные, диапазон от 100 до 1200 МГц).
- Программное обеспечение для регистрации и предварительной обработки данных в режиме реального времени.
- Систему позиционирования (GPS/ГЛОНАСС) для пространственной привязки измерений.
- Транспортные платформы и каретки для перемещения антенн по дорожному полотну.

Антенные блоки являются сменными и могут подключаться к одному регистрирующему устройству, что делает систему гибкой и удобной в эксплуатации.

Антенные блоки и их применение

- Низкочастотные антенны (100–250 МГц) – обеспечивают зондирование на глубину до 5–6 м. Используются для изучения основания дорожной одежды, земляного полотна, а также для выявления крупных неоднородностей, связанных с переувлажнением, кавернами или потерей несущей способности грунтов.
- Среднечастотные антенны (400–600 МГц) – позволяют получать данные о состоянии слоев дорожной одежды на глубине до 2–3 м. Эти антенны применяются при контроле качества строительства и ремонта дорог, для определения толщины асфальтобетонных и щебеночных слоев.
- Высокочастотные антенны (900–1200 МГц) – дают высокое разрешение при обследовании верхних 0,5–1,5 м покры-

тия. Используются для локализации трещин, зон расслаивания, пустот и других мелкомасштабных дефектов в асфальтобетоне.

Таким образом, правильный выбор антенн определяет как глубину исследования, так и точность выявления аномалий.

Рабочие режимы и параметры.

Комплекс «ОКО-3» поддерживает несколько режимов сбора данных:

- А-скан – запись отдельных трасс во временной области. Применяется для калибровочных измерений и настройки аппаратуры.

- В-скан – получение непрерывного профиля при перемещении антенны вдоль дорожного полотна. Основной режим для инженерных обследований.

- С-скан – двумерная визуализация с использованием набора параллельных профилей. Позволяет получать карты распределения слоев и дефектов.

Ключевые параметры, настраиваемые оператором:

- частота дискретизации (до 1000 МГц, в зависимости от антенны);

- глубина зондирования (определяется частотой и скоростью распространения волн в среде);

- оконные функции и коэффициенты усиления;

- скорость движения и шаг записи трасс.

Программное обеспечение. Для работы с комплексом используется специализированное ПО (RadExplorer, GeoScan и др.), позволяющее:

- регистрировать данные в режиме реального времени;
- выполнять первичную фильтрацию и коррекцию сигналов;
- производить настройку параметров дискретизации и масштабирования;

- сохранять данные в формате, пригодном для последующей цифровой обработки (SEG-Y, DAT, RD3).

Особенность программного обеспечения – наличие встроенных алгоритмов автокоррекции времени прихода сигналов, выравнивания нулевой линии и базовых фильтров. Это облегчает первичный анализ результатов непосредственно в полевых условиях.

Преимущества применения комплекса «ОКО-3» в дорожных обследованиях:

- Универсальность – возможность диагностики всех основных элементов дорожной конструкции, от покрытия до основания.

– Неразрушающий метод – отсутствие необходимости бурения или вскрытия дорожной одежды.

– Оперативность – высокая скорость регистрации данных (до 20–30 км обследуемого покрытия за смену).

– Совместимость с другими методами контроля – комплексные обследования с лабораторными испытаниями и геодезическими методами.

– Гибкость настроек – адаптация режимов работы под конкретные задачи (локальный контроль или сплошная диагностика).

Практическое применение.

Использование комплекса «ОКО-3» позволяет решать следующие задачи:

- определение толщины и структуры слоев дорожной одежды;
- выявление зон переувлажнения и ослабленных грунтов;
- диагностика трещин, пустот, каверн и расслаиваний в асфальтобетоне;

- контроль качества выполненных ремонтных работ;

- составление геоэлектрических разрезов и карт состояния дорожного полотна.

В практике дорожных обследований комплекс зарекомендовал себя как надежное средство, обеспечивающее высокую информативность при минимальных временных затратах.

4.3. Алгоритм обработки и выделения слоев дорожной одежды в программном комплексе CartScan

Шаг №1. Открываем приложение Cartsan.



Рисунок 4.1 - Рабочий стол

Шаг №2. Нажимаем на кнопку «Работа с данными» (F3).



Рисунок 4.2 - CartScan

Шаг №3. Нажимаем на многоточие (...) и находим нужную папку, в котором находятся георадарные данные.

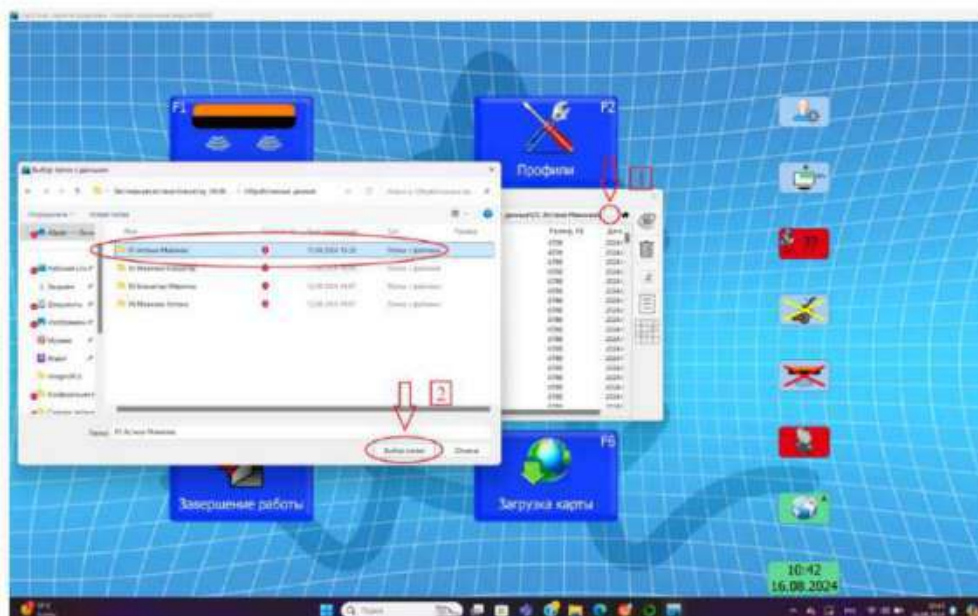


Рисунок 4.3 - Находим профиль

Обнуляем усиление в правом нижнем углу экрана.

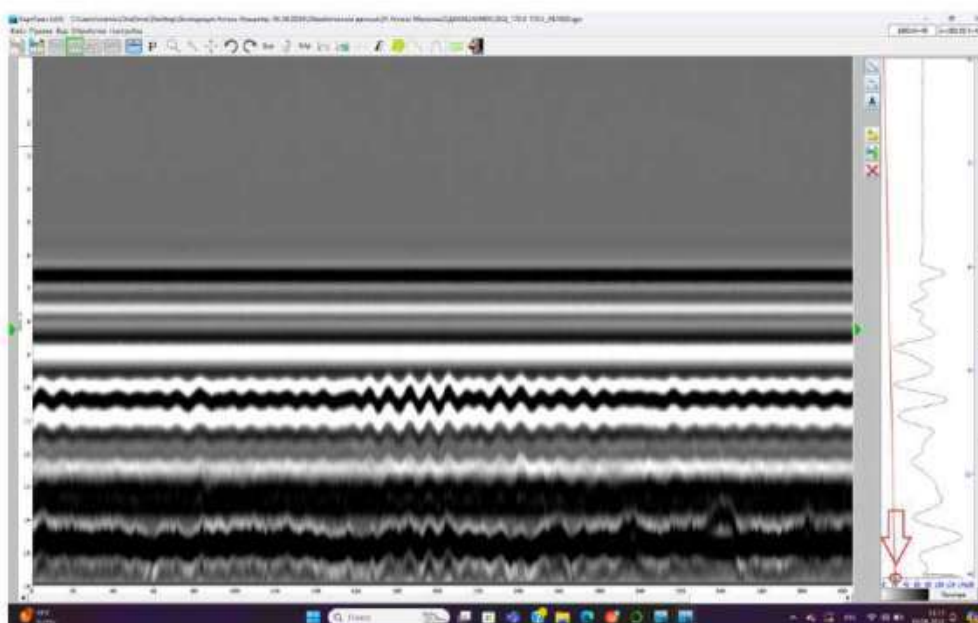


Рисунок 4.5 - Обнуление усиления

Результат после обнуления усиления.

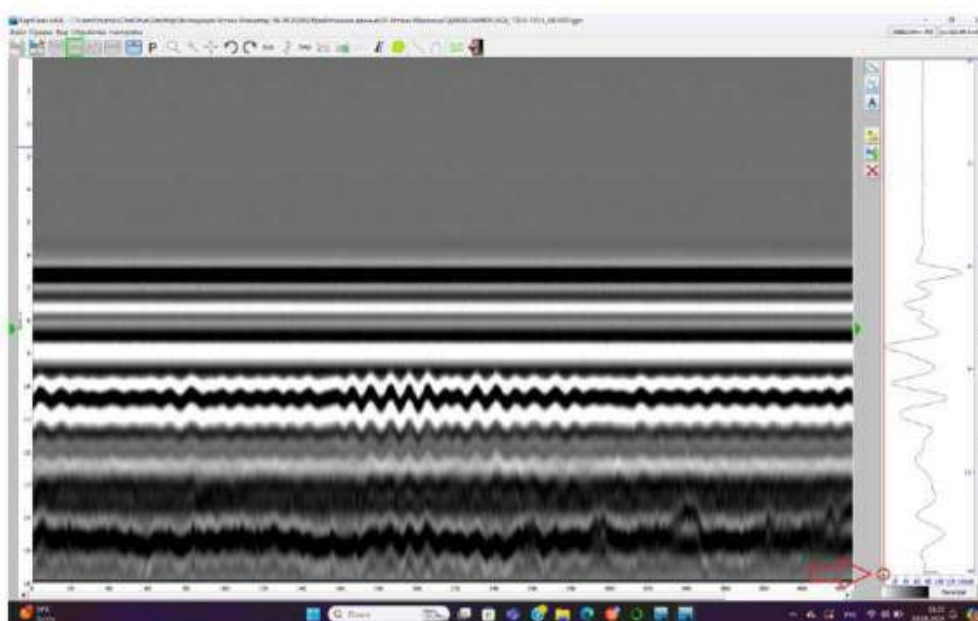


Рисунок 4.6 - Результат после обнуления усиления

Шаг №5. Нажимаем на кнопку «Полосовая фильтрация» сверху.

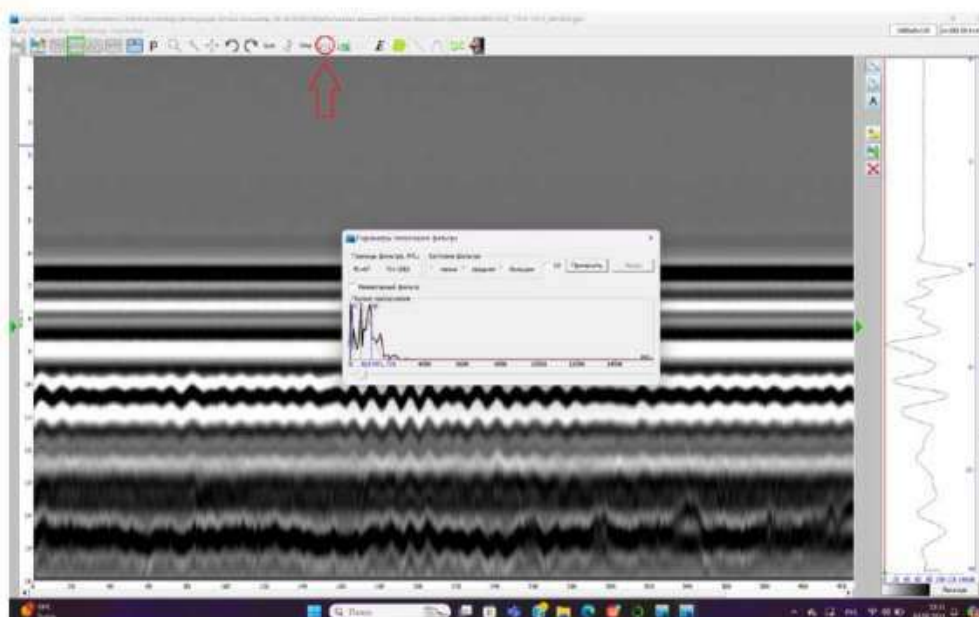


Рисунок 4.7 - Настройка полосовой фильтрации

Нажимаем на галочку логарифмической шкалы. Перемещаем вертикальную линию справа f_2 до бесконечности, а вертикальную линию слева f_1 сдвигаем так, чтобы очистить сигнал от производственных шумов (кабелей, проводов, звуки машин и т.д.).

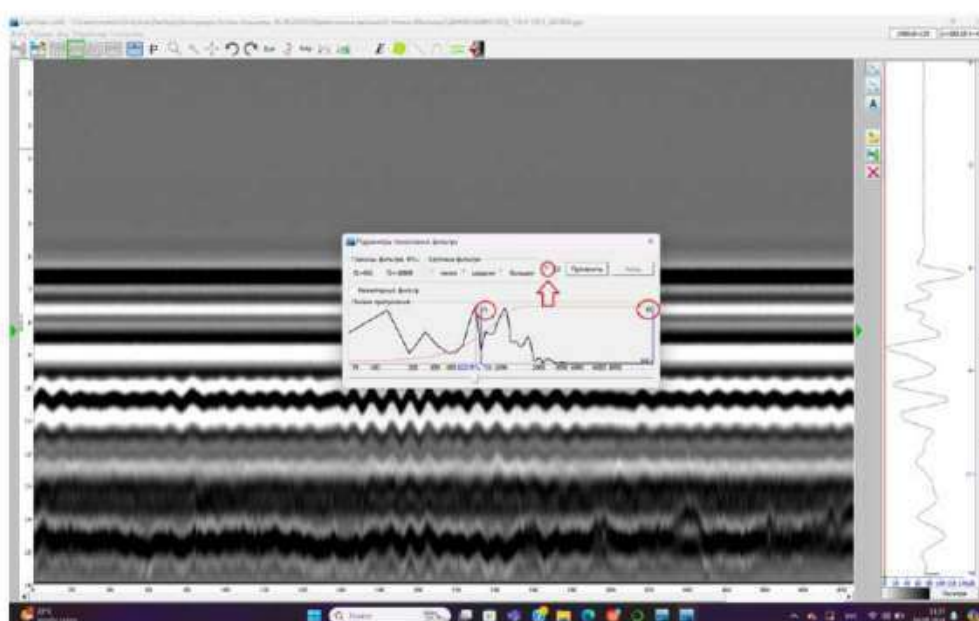


Рисунок 4.8 - Применение логарифмической шкалы

Нажимаем на кнопку применить (при необходимости можно применять несколько раз).

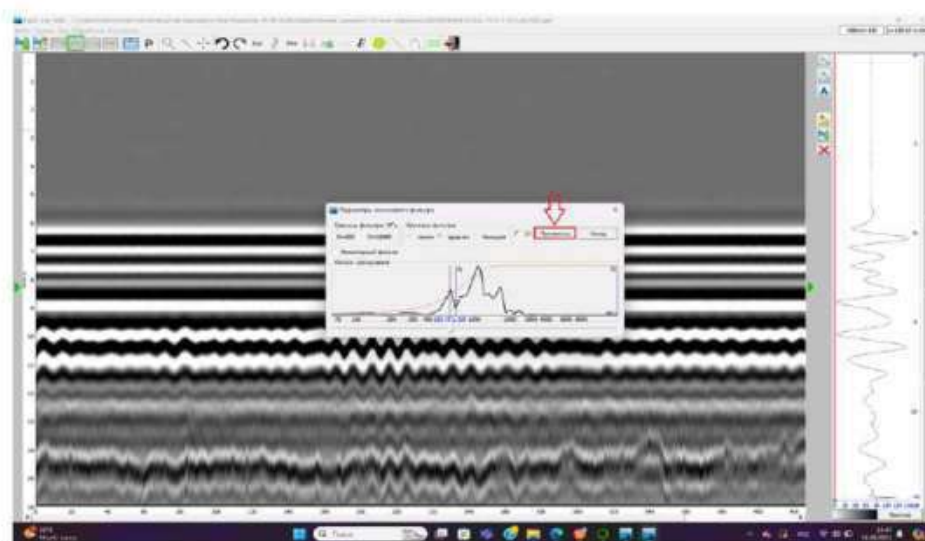


Рисунок 4.9 - Результат после применения полосовой фильтрации

Шаг №6. На данном этапе в зависимости от применения вычитания среднего можно оставить полученные результаты, либо вернуться в изначальные данные. Все зависит от четкости полученных данных. Сделаем предварительные настройки для вычитания среднего. Для этого начинаем на кнопку «Настройки» в левом верхнем углу, далее нажимаем на «Настройки вычитания среднего» и выставляем точность равной 85% (оптимальный вариант).

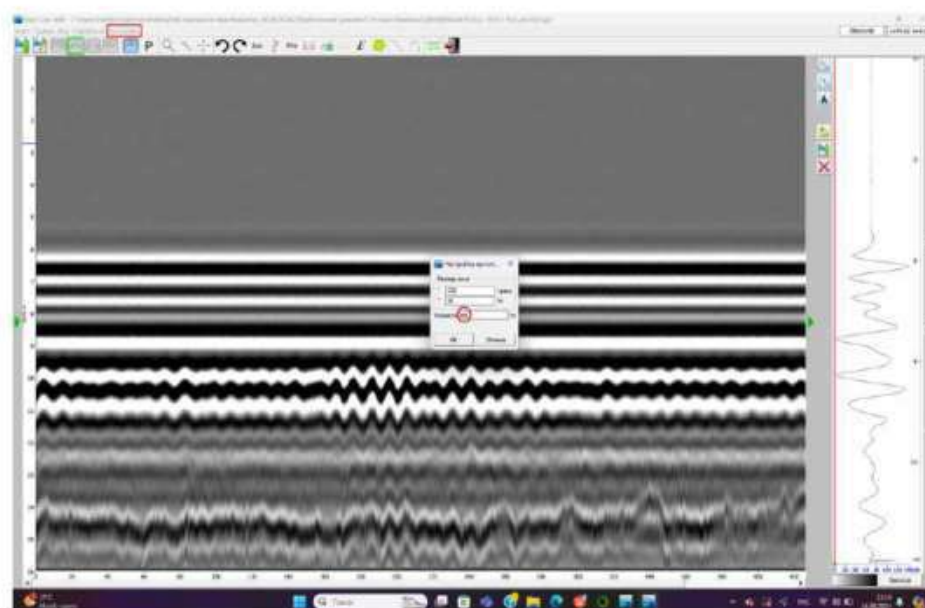


Рисунок 4.10 - Применение вычитания среднего
Применяем вычитание среднего, нажав на кнопку «Sub».

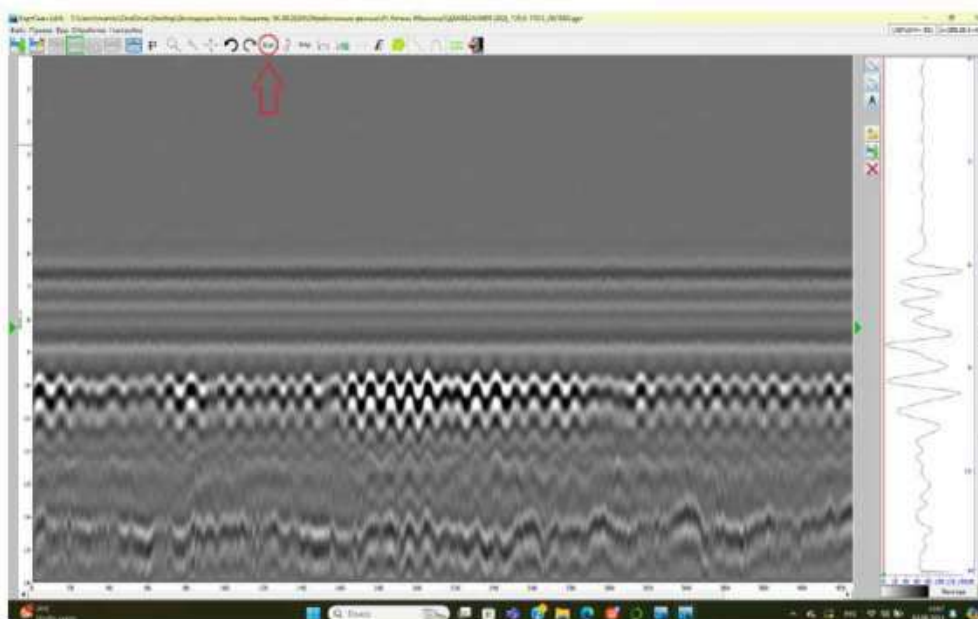


Рисунок 4.11 - Результат после применения полосовой фильтрации

Как видно из картинки выше данные получились нечёткими, поэтому увеличиваем усиление до 20.

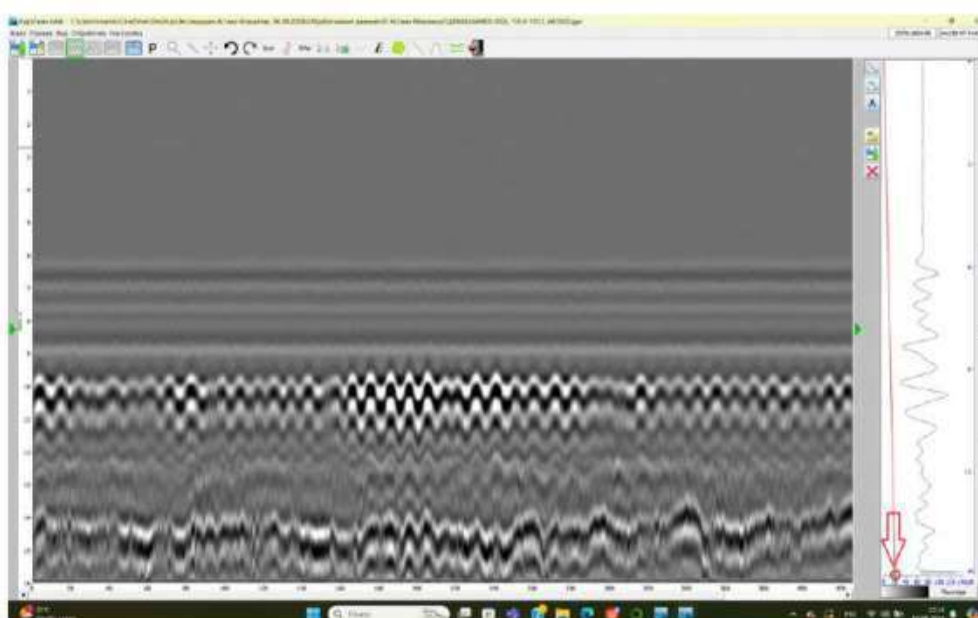


Рисунок 4.12 - Применение усиления

Пробуем усилить его до 40 и видим, что самая нижняя граница более чётко видно.

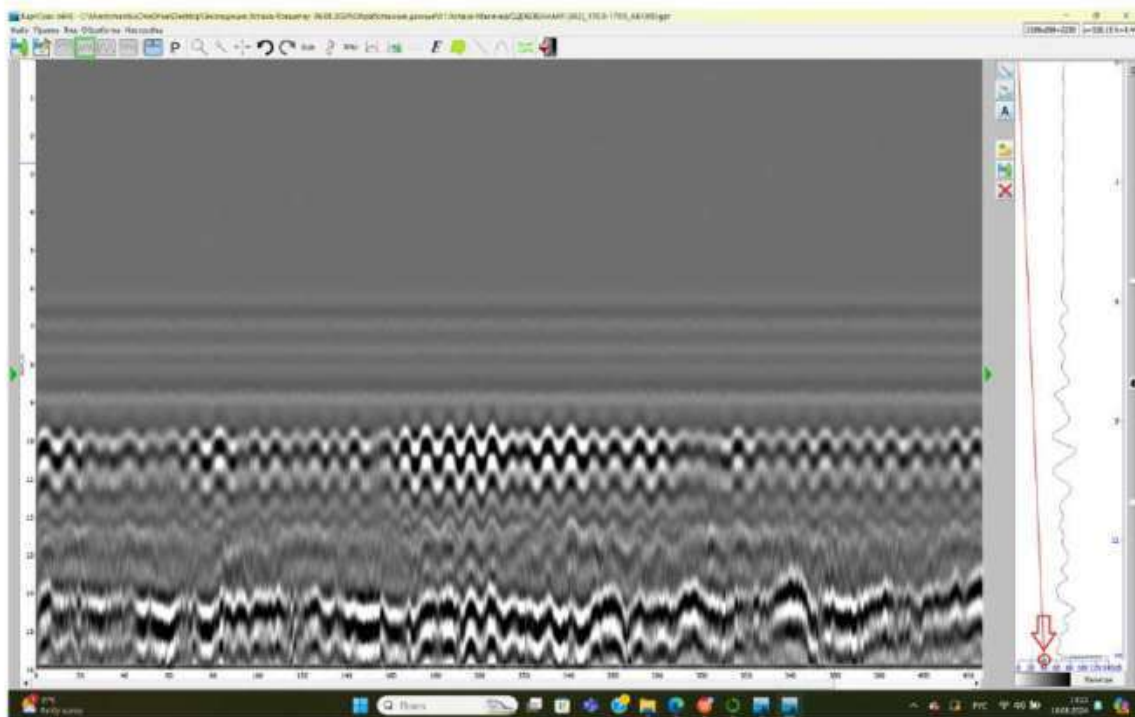


Рисунок 4.13 - Применение усиления до 40

Если тяжело подобрать оптимальное усиление, то можно применить автоматическое усиление.

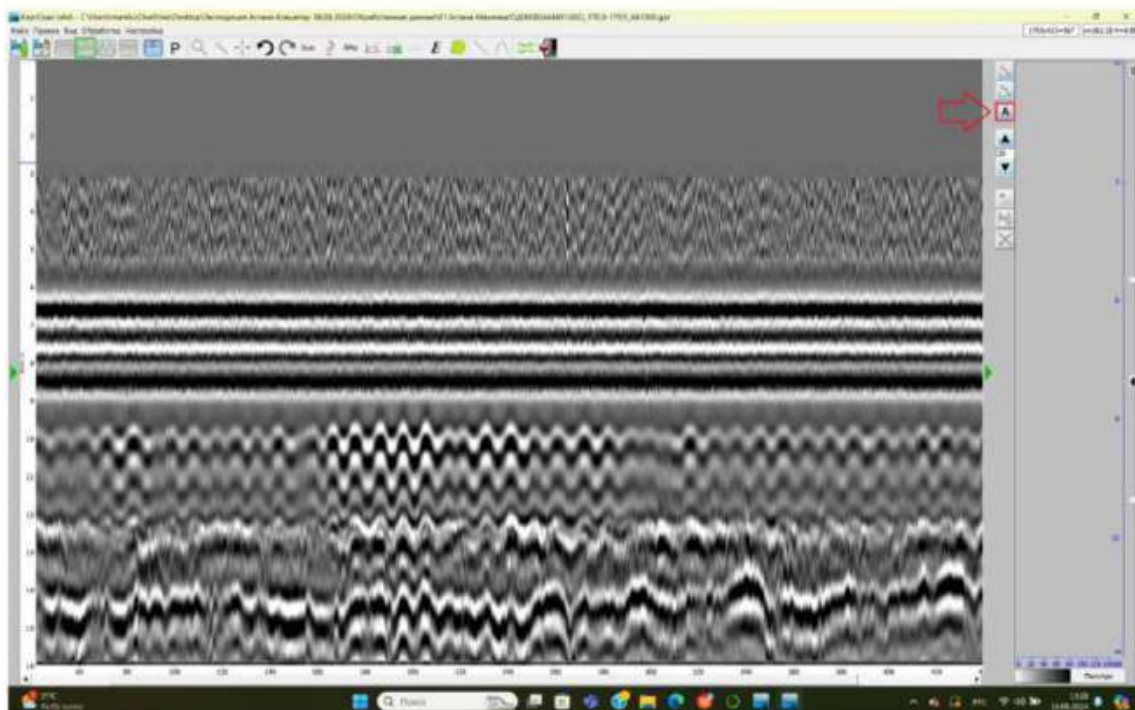


Рисунок 4.14 - Применение автоматического усиления
Остановимся на выборе с использованием вычитания среднего

Шаг №7. Нажмём на зелёный треугольник слева.

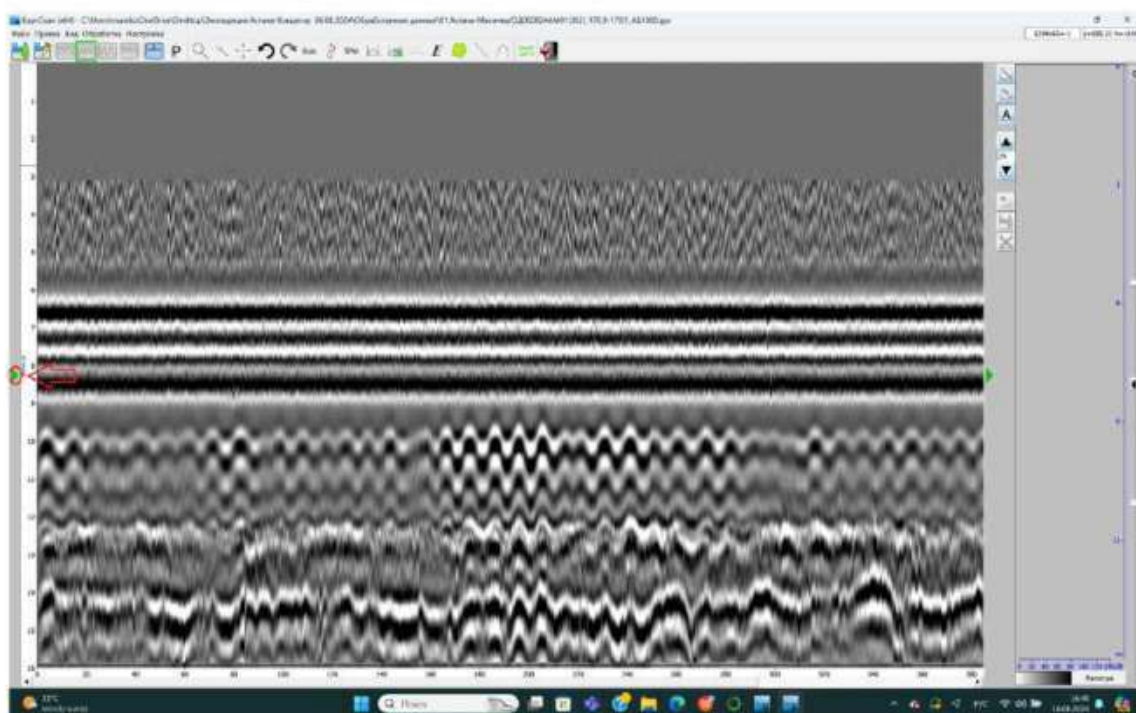


Рисунок 4.15 - Обработанный профиль от шумов и помех

Перенесём синий ползунок слева до первой белой горизонтальной линии так, чтобы слева ползунок оказался ровно на локальном минимуме.

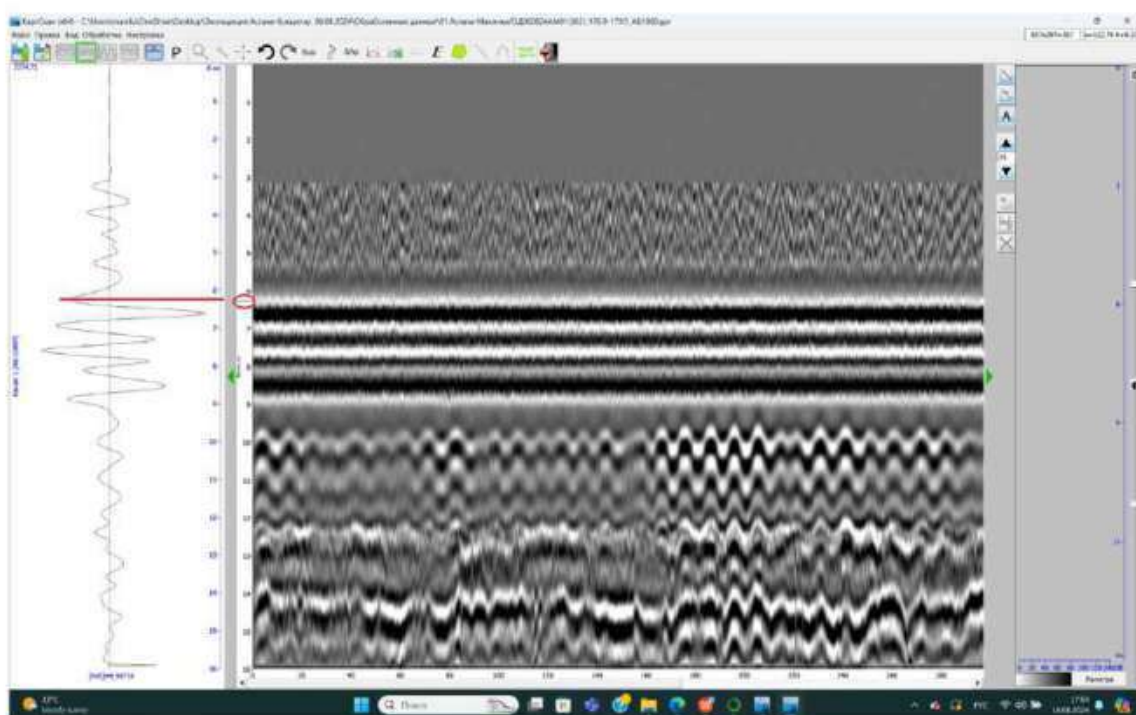


Рисунок 4.15 - Нахождение границы первого слоя (воздуха)

Шаг №8. Нажимаем на кнопку «Выделение слоев» сверху.

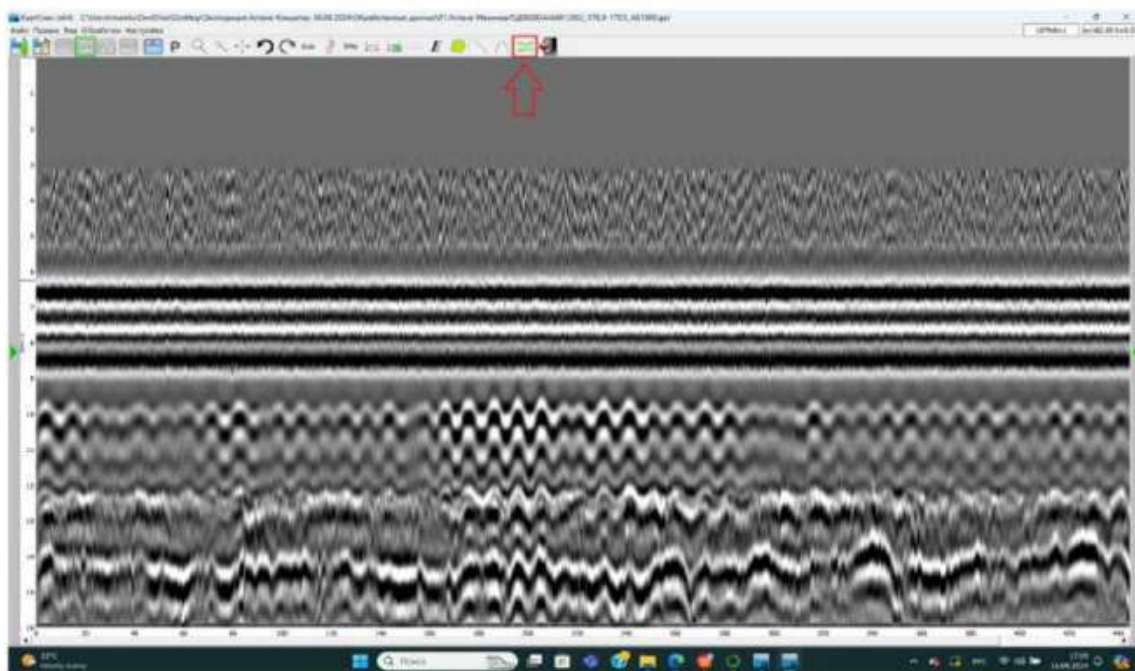


Рисунок 4.16 - Применяем функцию «выделения слоев»

Шаг №9. Меняем свет первого слоя (воздуха) на белый, а затем, нажимая на плюсики слева сверху, добавляем следующий слой (асфальт).

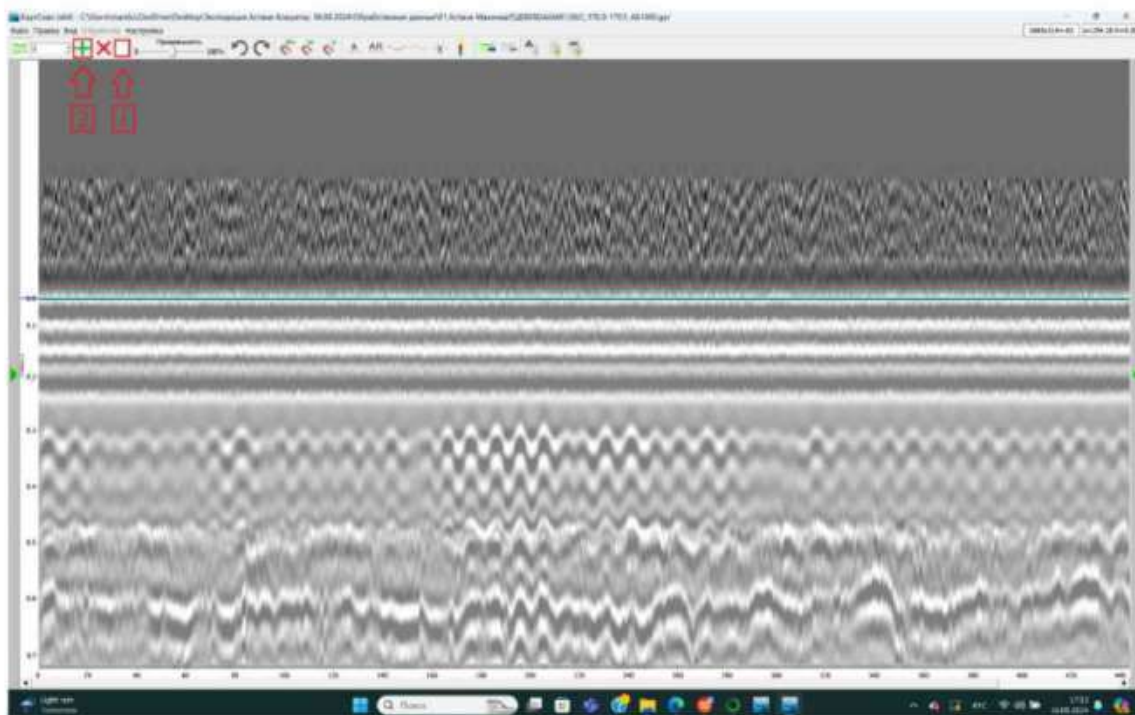


Рисунок 4.17 - Первый слой – воздух

Шаг №10. М+ это выделение границ слоев по черным горизонтальным линиям, М – это по белым горизонтальным линиям, а 0 это между черным и белым горизонтальными линиями. Нажмем на М- и на кнопку «А» (Автоматическое выделение слоев) и найдем поверхность асфальта. Далее, выбираем нужную границу и нажимаем на левую кнопку мыши.

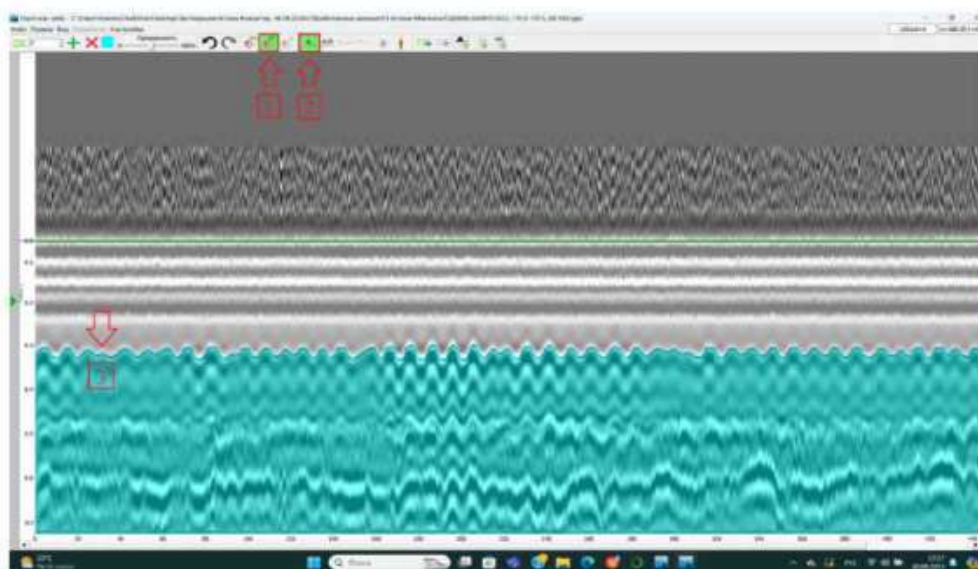


Рисунок 4.19 - Второй слой – асфальт

Выделим следующую границу под асфальтом, предварительно нажав на плюсик.

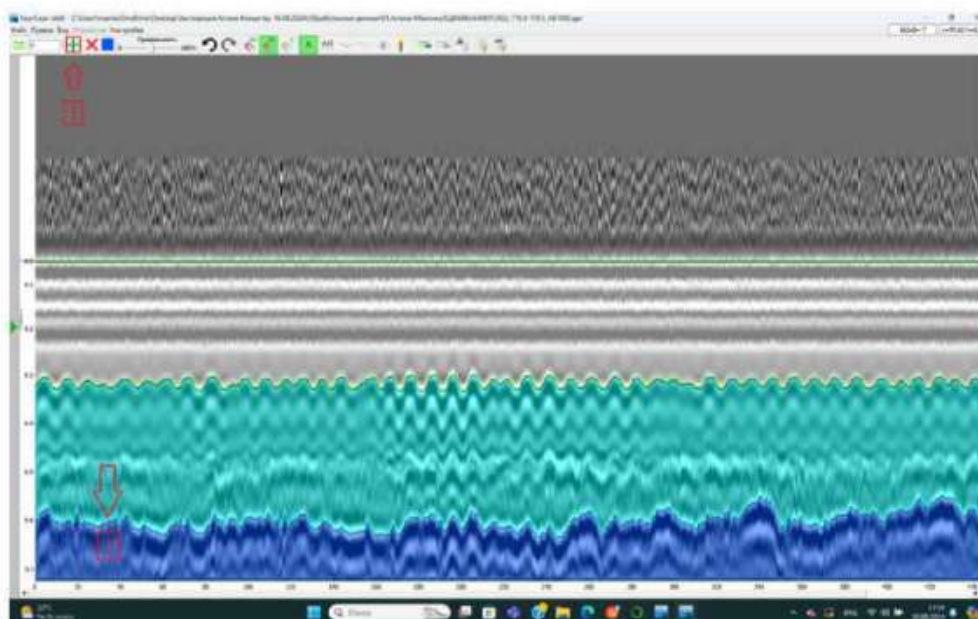


Рисунок 4.20 - Третий слой – щебенка

Пример очистки для АБ – 400

Аналогично предыдущему примеру проведем очистку сигнала теперь для АБ400.

Шаг №1. Обнулим усиление.

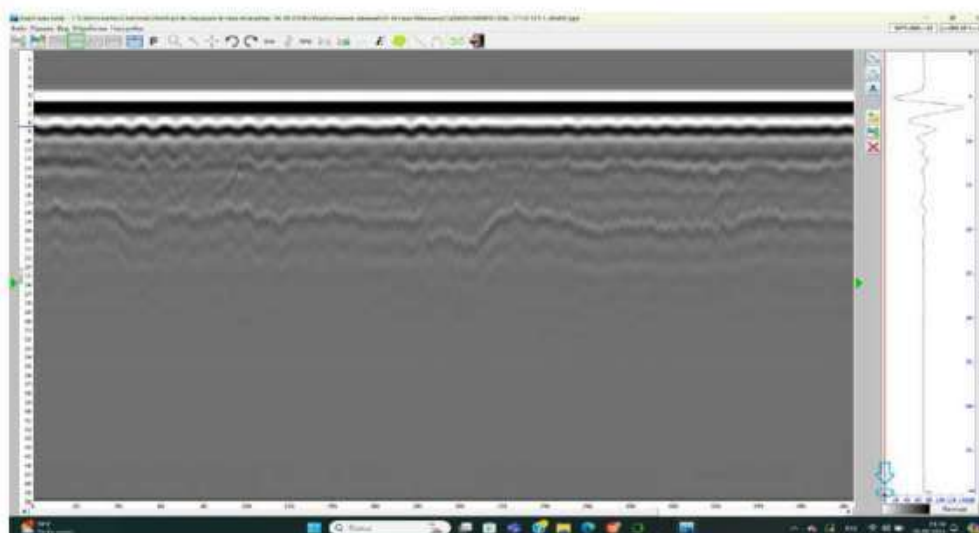


Рисунок 4.21 - Профиль (400 МГц)

Шаг №2. Синий ползунок слева сверху сдвинем в верх до первой белой горизонтальной линии.

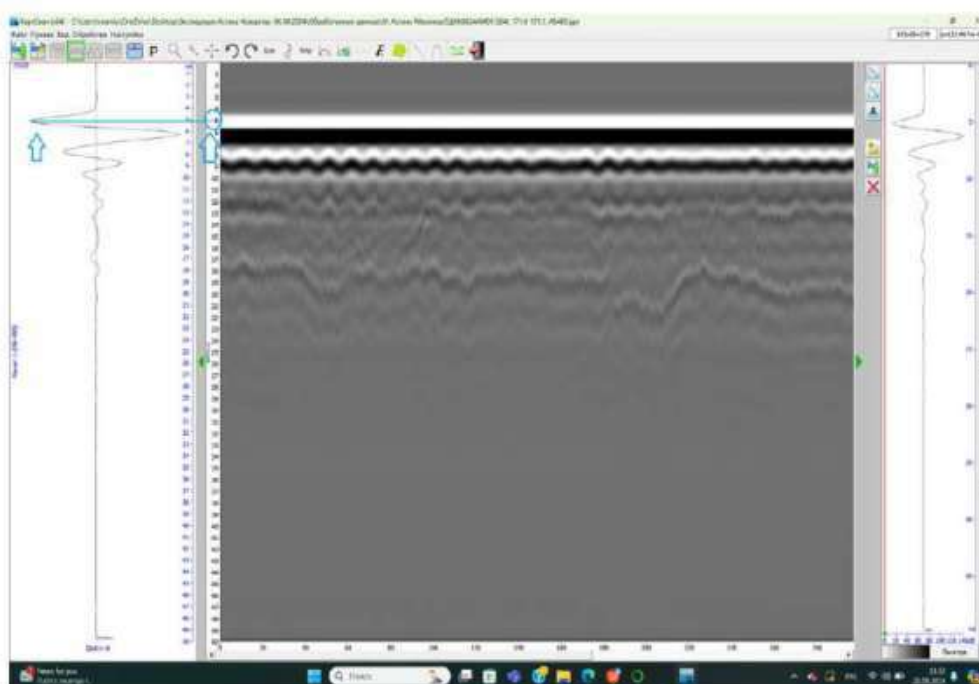


Рисунок 4.22 - Находим верхнюю границу воздуха

Шаг №3. Применим полосовую фильтрацию.

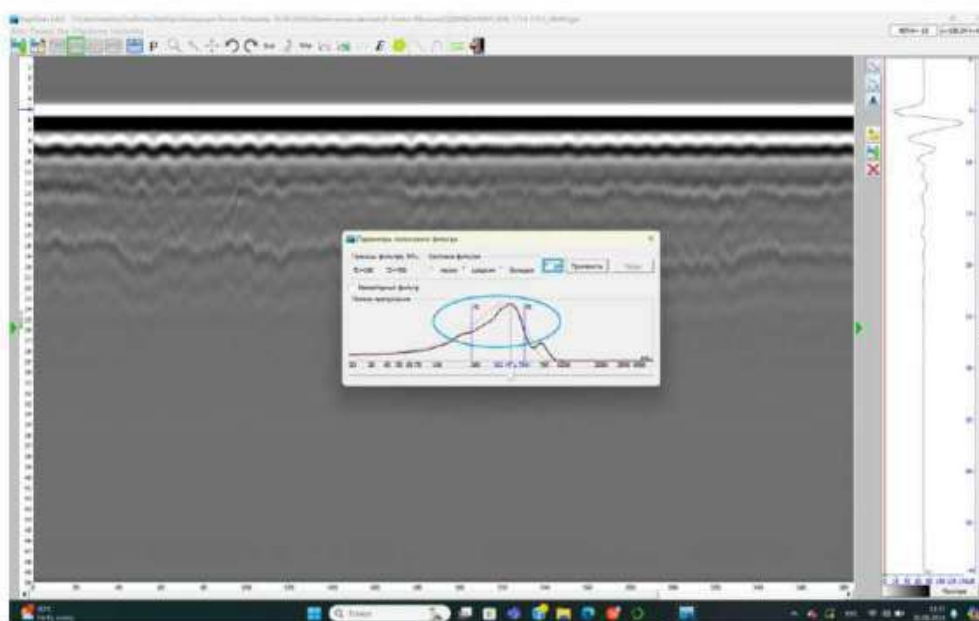


Рисунок 4.23 - Применяем полосовую фильтрацию

Как мы видим из предыдущей картинке график является гладким, поэтому применение полосовой фильтрации практически не изменит сигнал. Обойдемся без применения полосовой фильтрации.

Шаг №4. Применим вычитание среднего (кнопка «Sub») и нажмем на кнопку «A» справа.

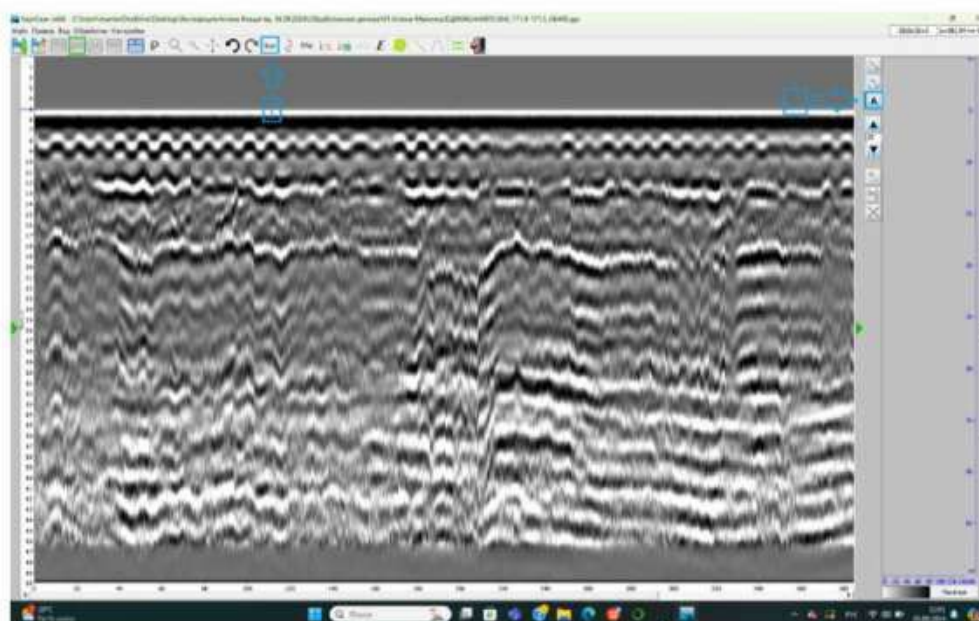


Рисунок 4.24 - Применяем вычитание среднего и автоматическое усиление

Шаг №5. Нажимаем на выделение слоев и добавляем первый слой (воздух).

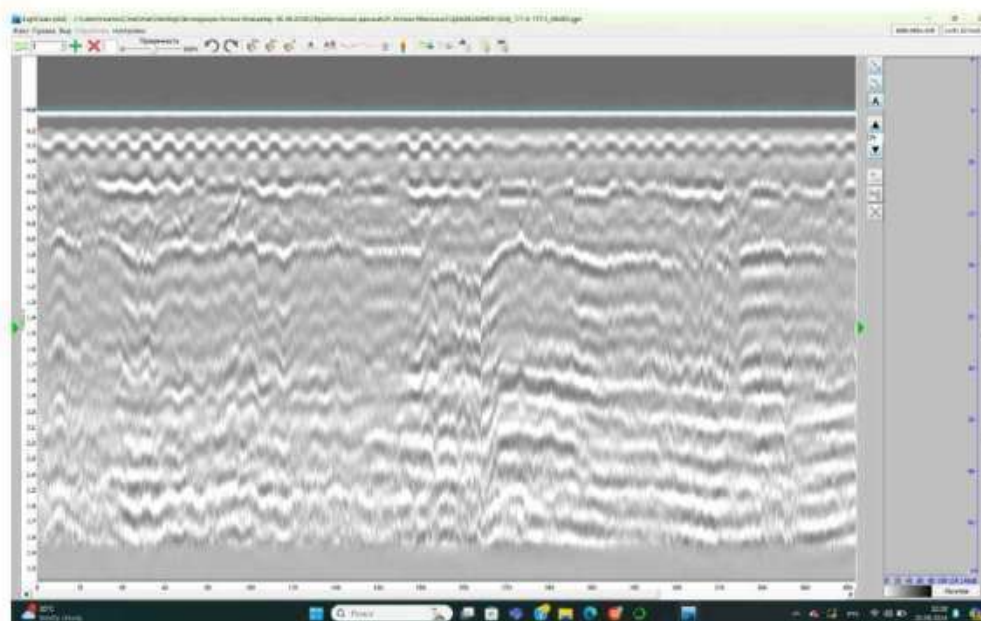


Рисунок 4.25 - Выделяем первый слой (воздух)

Шаг №6. Нажимаем на плюсики, чтобы добавить новый слой. Нажимаем на М-. Добавляем верхний слой (асфальт) нажав на кнопку «А» сверху (автоматическое выделение слоев).

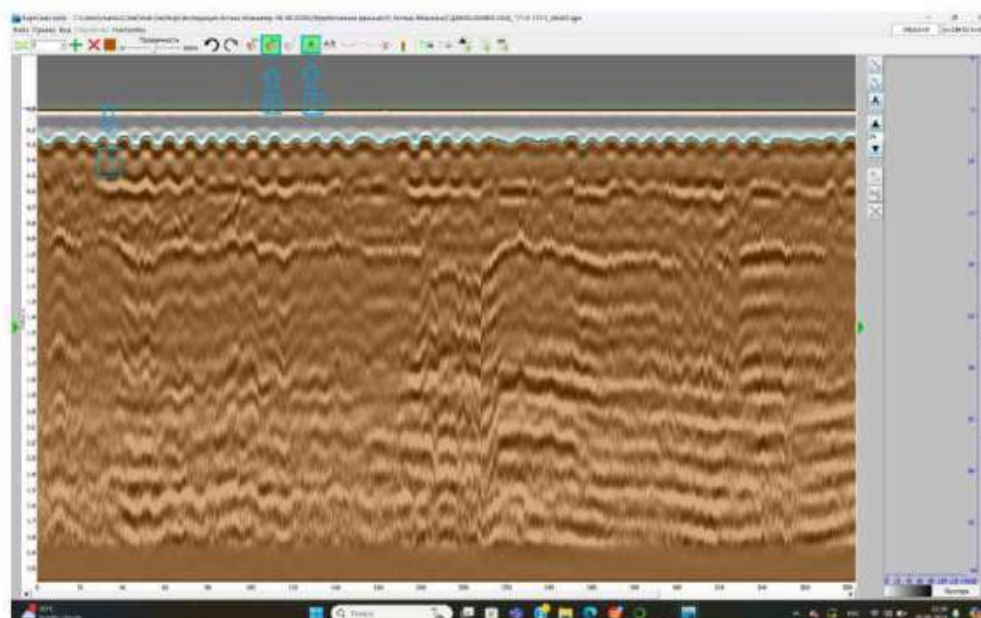


Рисунок 4.26 - Выделяем второй слой (асфальт)

Аналогично добавляем остальные слои.

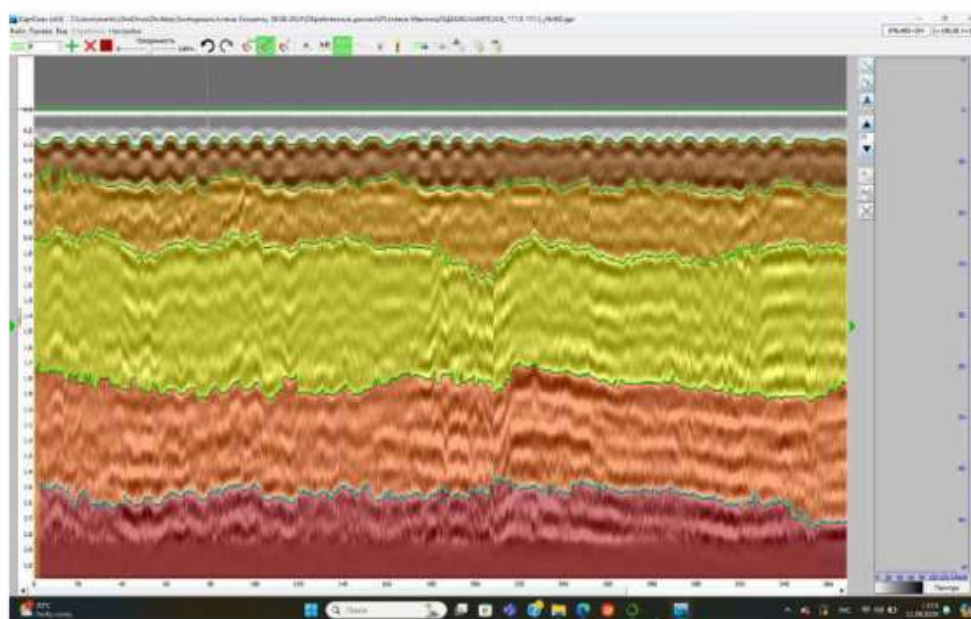


Рисунок 4.27 - Выделяем остальные слои

В результате выполнения алгоритма обработки георадарных данных в программном комплексе CartScan обеспечивается формирование корректного, очищенного от шумов и помех радиолокационного профиля, пригодного для надежного выделения границ конструктивных слоёв дорожной одежды. Поэтапное применение таких операций, как обнуление усиления, полосовая фильтрация, вычитание среднего и автоматическая регулировка усиления, позволяет значительно повысить качество сигнала и повысить читаемость границ слоёв. Программный комплекс предоставляет возможность гибкой настройки параметров обработки, что особенно важно при работе с разными типами антенн (АБ-1000, АБ-400) и различными условиями трассы.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет стандартизировать процесс обработки георадарной информации, минимизировать субъективность оператора и обеспечить высокую точность интерпретации георадарных разрезов. Применение CartScan способствует повышению эффективности диагностических работ и формированию достоверной модели строения дорожной конструкции, необходимой для последующего анализа её технического состояния и планирования ремонтных мероприятий.

4.4 Проектирование базы данных GPR-исследований

Экспериментальные данные, полученные после обработки программно-измерительным комплексом дорожной лаборатории, требуют системного хранения для оптимальной работы. Далее, чтобы эффективно использовать собранную экспериментальную информацию о реальном состоянии дорожного покрытия, спроектирована база данных полученных экспериментальных исследований дорожной одежды. Качественная разработка базы данных играет существенную роль в управлении данными, позволяя максимально эффективно хранить, извлекать данные, а также управлять ими.

Проектирование базы данных можно определить как набор процедур или совокупность задач, включающих различные шаги, предпринятые для реализации базы данных. Проектирование базы данных является важным этапом жизненного цикла разработки программного обеспечения, который включает различные операции с базой данных, таких как хранение, извлечение данных и манипулирования ими. Далее приведены некоторые важные моменты, которые рекомендуется учитывать для достижения надежного проектирования базы данных: необходимо поддерживать согласованность и целостность данных; низкая избыточность; быстрый поиск по индексу; следует принять меры безопасности, применяя различные ограничения целостности; данные должны храниться фрагментированными битами информации в максимально атомарном формате. Также следует учитывать, что в зависимости от требований критерии могут быть изменены.

При проектировании базы данных были учтены сведения, представленные в предыдущих разделах работы. В разделе 1 проведён анализ нормативно-правовых документов Республики Казахстан, регулирующих требования к проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог на международном, республиканском, областном и местном уровнях. Также систематизированы справочные данные о классификации автомобильных трасс, их обозначениях, индексах и протяжённости, что позволяет использовать их в качестве нормативно-справочной составляющей информационной системы. Кроме того, детально рассмотрены конструктивные параметры дорожной одежды,

включающие характеристики слоёв асфальтобетона, щебёночного основания, песчаного слоя и земляного полотна. Данные сведения обеспечивают корректную интерпретацию георадарных данных с учётом особенностей многослойной структуры обследуемых дорожных участков. В выше приведены технические характеристики антенных блоков георадара серии «ОКО», для которых в системе предусмотрен отдельный справочник. Особенности формирования и регистрации георадиолокационных сигналов позволяют формировать параметры сканирования и массивы данных отражений, подлежащие первичной обработке в специализированном программном обеспечении. Результаты комплексных полевых испытаний, описанные, включают данные георадарного зондирования различных дорожных покрытий, а также результаты лабораторного анализа кернов, отобранных с обследуемых участков. Эти сведения служат источником достоверных входных данных для тестирования вычислительных алгоритмов. В разделе 9 представлено специализированное программное обеспечение, разработанное для обработки полученных сигналов и подготовки данных к внесению в систему.

Таким образом, совокупность нормативно-технической информации, конструктивных характеристик дорожной одежды и экспериментальных результатов позволила сформировать требования к архитектуре базы данных. Разработанная структура обеспечивает систематизированное хранение данных полевых обследований и лабораторных исследований, а также их эффективное использование при аналитической обработке и интеграции в вычислительные алгоритмы диагностики дорожной одежды.

База данных предназначена для хранения информации об экспериментальных исследованиях дорожной одежды с помощью георадара Око-2. Она поддерживает хранение информации о дорожных покрытиях, антеннах, файлах экспериментов, данных экспериментов и сырых данных, а также результатах испытаний кернов. Это позволяет специалистам вести учет результатов исследований, анализировать изменения характеристик материалов и вести архив проведенных испытаний и их результатов.

Разработанная семантическая модель базы данных, изображенная на рисунке 14.28, отражает основные функциональные компоненты системы и взаимосвязи между

сущностями, обеспечивающими поддержку полного цикла работы с результатами георадарных исследований дорожной одежды.

Модель включает следующие подсистемы: .

Администрирование. Данный модуль обеспечивает управление правами доступа и учетными записями пользователей. Реализованы операции: создание пользователя, редактирование данных пользователя, удаление учетной записи. Администрирование гарантирует контроль целостности, безопасности и разграничения ролей в системе.

Справочники. Содержит нормативно-справочную информацию, используемую в исследованиях. В структуру входят три ключевых справочника, описанные в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Описание справочников базы данных

Справочник	Назначение	Основные операции
Тип антенны	Хранение технических характеристик антенных блоков георадара «ОКО-2»	Создать / Изменить / Удалить
Автодороги РК	Сведения о классификации, индексах и протяжённостях дорог	Создать / Изменить / Удалить
Слои дорожной одежды	Описание конструктивных характеристик слоев	Создать / Изменить / Удалить

Эксперименты. Центральный компонент системы, предназначенный для хранения результатов георадарных обследований.

Функциональность включает:

Создание нового эксперимента: загрузка параметров сканирования, добавление вспомогательных материалов (фотографии, протоколы и др.), загрузка файлов сырого сигнала, загрузка файлов обработанных данных.

Просмотр эксперимента: выгрузка файлов сырых данных, выгрузка обработанных данных, анализ профилей отражений

Эксперимент связан с конкретным участком дороги, типом антенной системы и временными параметрами съёмки.

Керны (лабораторные данные). Подсистема предназначена для интеграции полевых данных с результатами лабораторных испытаний.

Реализованы возможности: создание карточки образца (керна), загрузка файлов лабораторных результатов, привязка данных к конкретному эксперименту и месту отбора.

Разработанная семантическая структура формирует интеллектуальную основу вычислительной системы, позволяя: оптимизировать работу с георадарными данными, исключить потери информации, автоматизировать контроль качества дорожной одежды, обеспечивать аналитическую и прогнозную поддержку.

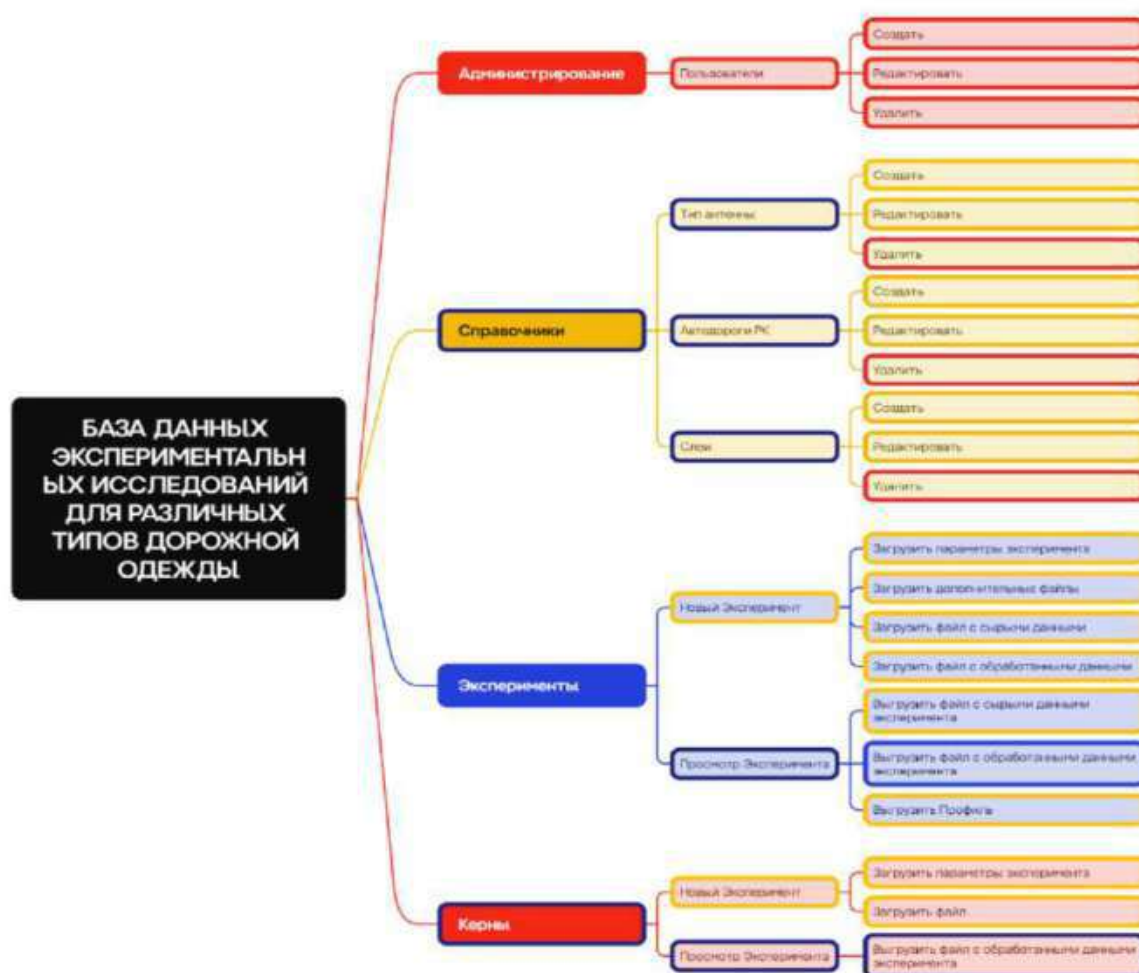


Рисунок 4.28 - Семантическая модель базы данных.
Основные бизнес процессы

На рисунке 4.29 представлена диаграмма «Сущность–Связь» (ER-диаграмма), отображающая концептуальную структуру разработанной базы данных и взаимосвязи между её основными

информационными объектами. Модель включает сущности, обеспечивающие управление пользователями, хранение сведений об антенных блоках георадара, дорожной инфраструктуре, результатах георадарных экспериментов, а также лабораторных исследованиях кернов.

В модели выделены ключевые сущности: User, Antena, Experiment, ExperimentFile, ExperimentRawData, ExperimentData, Road, RoadType и Kern, каждая из которых обладает набором характеристик, необходимых для корректного ведения, организации и анализа данных. Связи между сущностями определяют логическую целостность данных и позволяют устанавливать соответствие между полевыми измерениями, нормативно-справочной информацией и физико-механическими свойствами дорожной одежды.

Разработанная диаграмма ER-модели обеспечивает:

- структурно-логическую согласованность данных,
- взаимосвязанное хранение исходных и обработанных результатов георадарных обследований,
- интеграцию полевых измерений с лабораторными испытаниями кернов,
- поддержку расширяемости и масштабируемости информационной системы.

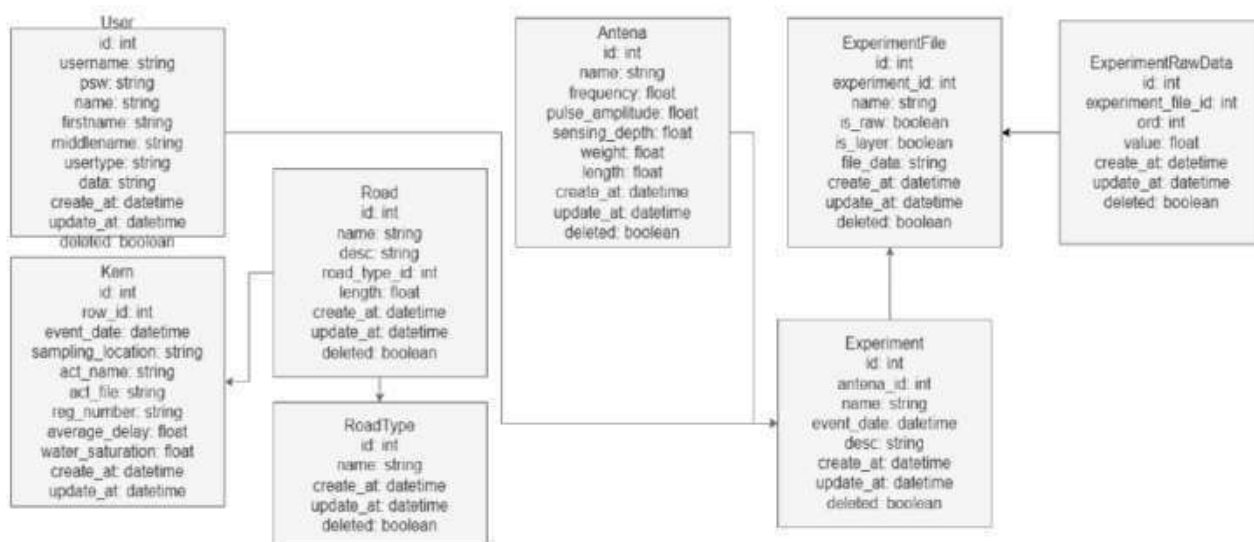


Рисунок 4.29 – Диаграмма отношений сущностей баз данных

Качественное проектирование базы данных является ключевым элементом эффективной системы управления данными,

формируя основу для их структурированного хранения, надёжного извлечения и дальнейшей аналитической обработки. Архитектура и логическая организация базы данных напрямую определяют производительность, масштабируемость и отказоустойчивость информационной системы.

Создание базы данных играет важную роль в современном управлении данными, помогая эффективно хранить, извлекать данные и управлять ими. Хранение и обработка данных георадиолокационных измерений для диагностики дорожной одежды в Казахстане, особенно в условиях сурового климата Акмолинской области, является актуальной задачей для повышения качества и долговечности дорог. Для улучшения качества автодорог страны, их проектирования, строительства и реконструкции необходима полная и достоверная информация о параметрах дорожного покрытия. Данная база данных предназначена для хранения, управления и анализа данных, полученных в результате экспериментальных исследований дорожной одежды (слоев дорожного покрытия). Основная область применения — исследовательские и научные проекты, направленные на изучение состояния и свойств дорожных покрытий с использованием различного оборудования. Может быть использована в отделе инновационных технологий Республиканского государственного предприятия на ПХВ «Национальный центр качества дорожных активов» Министерства индустрии и инфраструктурного развития РК, для мониторинга состояний дорожного полотна автомобильных трасс.

Функциональные возможности

- Хранение справочной информации о типах и названиях дорог Республики Казахстан, используемых антеннах радара Око-2, существующих слоях дорожной одежды.
- Хранение данных о проведенных экспериментах.
- Управление файлами, связанными с экспериментами (файл радара, GPR файл и другие).
- Управление с обработанными файлами экспериментов, получение «откликов среды».
- Управление пользователями с различными уровнями доступа, отслеживание изменений в данных (система аудита).
- Ведение учета данных по испытаниям кернов, включая плотность и водонасыщение материалов.

- Поиск и фильтрация данных по различным параметрам (например, по типам дорог, антенн, слоям и результатам экспериментов).

- Мягкое удаление данных с возможностью восстановления.

В этой базе данных можно выделить несколько ролей пользователей, каждая из которых обладает определённым набором прав и обязанностей. На рисунке 4.30 представлены возможные типы пользователей разрабатываемой системы, а также Таблица Users и ее свойства.



Рисунок 4.30 – Типы пользователей системы

Разделение на роли помогает управлять доступом к данным и функциональными возможностями системы.

Ниже приведены основные возможные роли, исходя из схемы базы данных:

1. Администратор системы:

Обязанности:

- Управление пользователями (создание, изменение, удаление).

- Назначение ролей пользователям.

- Контроль за целостностью базы данных и безопасностью данных.

- Управление настройками базы данных и её аудитом (отслеживание логов действий, фиксация изменений).

Права:

- Полный доступ ко всем таблицам и данным.
- Возможность создания, изменения и удаления любых записей, включая эксперименты, слои, антенны, дороги и данные экспериментов.
- Полный доступ к управлению учетными записями пользователей, включая удаление или восстановление записей (поле deleted).
- Доступ к системным функциям, таким как резервное копирование и восстановление данных.

2. Инженер-исследователь:

Обязанности:

- Проведение экспериментов с использованием различных антенн и оборудования.
- Ввод данных экспериментов в систему (сохранение данных об антеннах, слоях, файлах экспериментов).
- Проведение испытаний кернов и ввод соответствующих данных.

Права:

- Доступ к созданию записей в таблицах `experiment`, `experiment_files`, `experiment_data`, `experiment_raw_data`, `kern`.
- Возможность обновления данных по своим экспериментам.
- Ограниченные права на просмотр и изменение данных в других таблицах, таких как `antenna`, `layer`, `road`, и т.д.
- Нет прав на удаление данных или управление пользователями.

3. Гость (Read-Only Пользователь):

Обязанности:

- Просмотр данных без возможности их изменения.

Права:

- Доступ только для чтения ко всем таблицам базы данных.
- Никаких прав на создание, изменение или удаление записей.

Эта роль может быть назначена для внешних проверяющих, аудиторов или третьих лиц, которым требуется доступ к данным для анализа без возможности их модификации.

Также, например, можно добавить пользователя Руководитель проекта.

Руководитель проекта:

Обязанности:

- Управление и мониторинг экспериментов.
- Назначение пользователей для выполнения исследований и ввода данных.

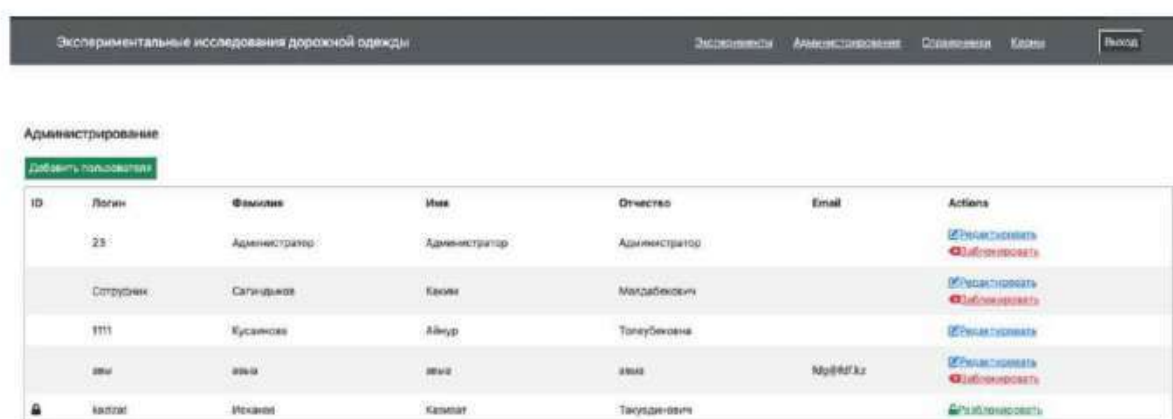
- Анализ полученных данных и составление отчетов.

Права:

- Доступ к таблицам, связанным с экспериментами, дорогами, антеннами, слоями и результатами экспериментов.
- Возможность создания и изменения записей в таблицах experiment, experiment_files, experiment_data, experiment_raw_data, kern.
- Возможность просматривать и анализировать данные, но не удалять критические записи (доступ к полю deleted ограничен).
- Просмотр отчетов и анализ данных по испытаниям.

Такое разделение ролей помогает обеспечить безопасность и целостность данных, ограничивая доступ к критически важным операциям, таким как удаление и редактирование информации, только для уполномоченных пользователей. Роли, такие как администратор и руководитель проекта, обладают большим уровнем доступа, тогда как инженер-исследователь ограничены лишь функционалом, связанным с их непосредственными обязанностями.

На рисунке 4.31 показана Веб страница для Администрирования.



ID	Логин	Фамилия	Имя	Отчество	Email	Actions
23	Администратор	Администратор	Администратор	Администратор		Редактировать Удалить
Старухин	Салидинов	Каюм	Махматович			Редактировать Удалить
1111	Кусяинов	Айнур	Топубековна			Редактировать
ami	ami	ami	ami		my@bt.kz	Редактировать Удалить
картат	Исханов	Кармат	Тасуленович			Редактировать

Рисунок 4.31 – Веб страница для Администрирования

Следующий блок в базе данных – Справочники: типы антенн, слои дорожной одежды, типы дорог РК, и наименование и

описание дорог РК. На рисунке 4.32 показаны таблицы-справочники, а также подробное описание таблицы Антенны.



Рисунок 4.32 – Таблицы – справочники БД

На рисунке 4.33 представлена схема базы данных, которая описывает полученные эксперименты, проведенные с помощью георадара ОКО 2 с различными типами антенн, для различной дорожной одежды (слоями дорожного покрытия).

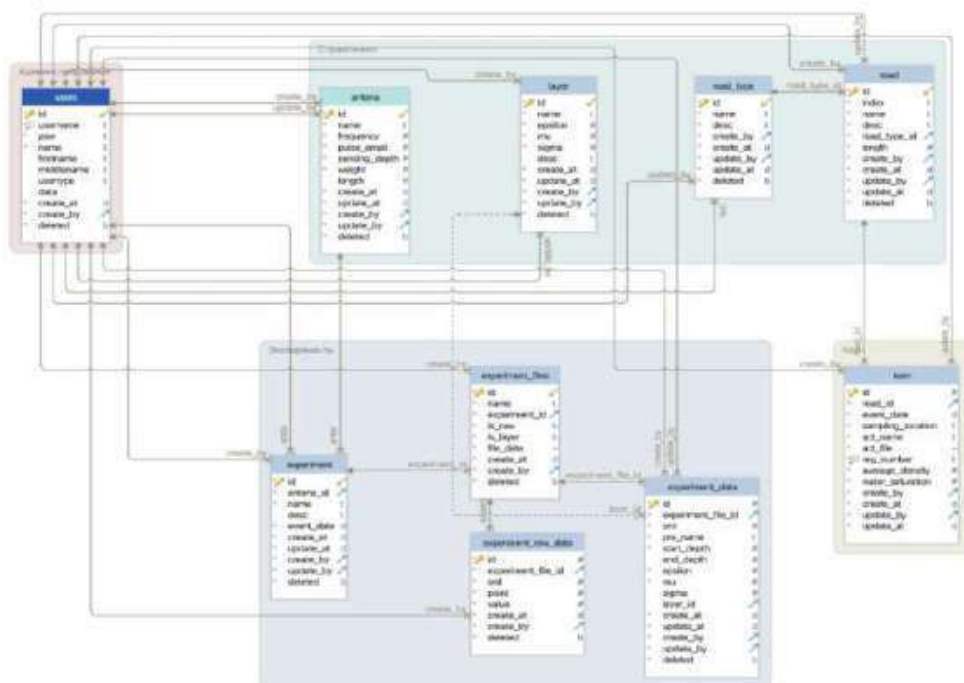


Рисунок 4.33 - Схема базы данных, которая описывает полученные эксперименты, проведенные с помощью георадара ОКО 2 с различными типами антенн, для различной дорожной одежды (слоями дорожного покрытия)

В качестве хранилища данных была выбрана СУБД PostgreSQL. PostgreSQL — это мощная реляционная база данных с открытым исходным кодом, которая обладает расширенным набором функций для обработки и хранения информации. С полной поддержкой алгоритмов транзакций и механизмов контроля целостности данных PostgreSQL обеспечивает высокую надежность и безопасность операций. Механизм работы базы данных PostgreSQL основан на ключевых принципах, которые обеспечивают ее надежность, эффективность и масштабируемость. База данных PostgreSQL использует новаторские методы обработки данных, что делает ее выдающейся в сфере управления информацией. Все компоненты бесплатны и неоднократно зарекомендовали себя в самого разного рода системах по всему миру.

Преимущества созданной базы данных:

1. Централизованное хранение данных: Все данные георадиолокационных обследований хранятся в едином месте, что обеспечивает лёгкий доступ к ним и уменьшает вероятность потери информации.

2. Автоматизация и интеграция с веб-приложением: Данные загружаются и обрабатываются автоматически, что экономит время и снижает вероятность ошибок, связанных с ручным вводом данных.

3. Быстрый доступ и структурированный поиск: Структура базы данных позволяет быстро находить и анализировать данные по конкретным участкам дорог, периодам обследования и другим параметрам.

4. Масштабируемость: База данных поддерживает подключение новых модулей и расширений, что делает систему гибкой для будущих потребностей и адаптации к новым задачам.

5. Сравнительный анализ и долговременное хранение: Накопленные данные позволяют отслеживать изменения в состоянии дорог и строить прогнозные модели, что важно для планирования ремонтов и профилактического обслуживания.

На рисунке 4.34 показана Веб страница для работы с Типами Антенн. На рисунке 4.35 показана страница для редактирования информации об Антеннах.

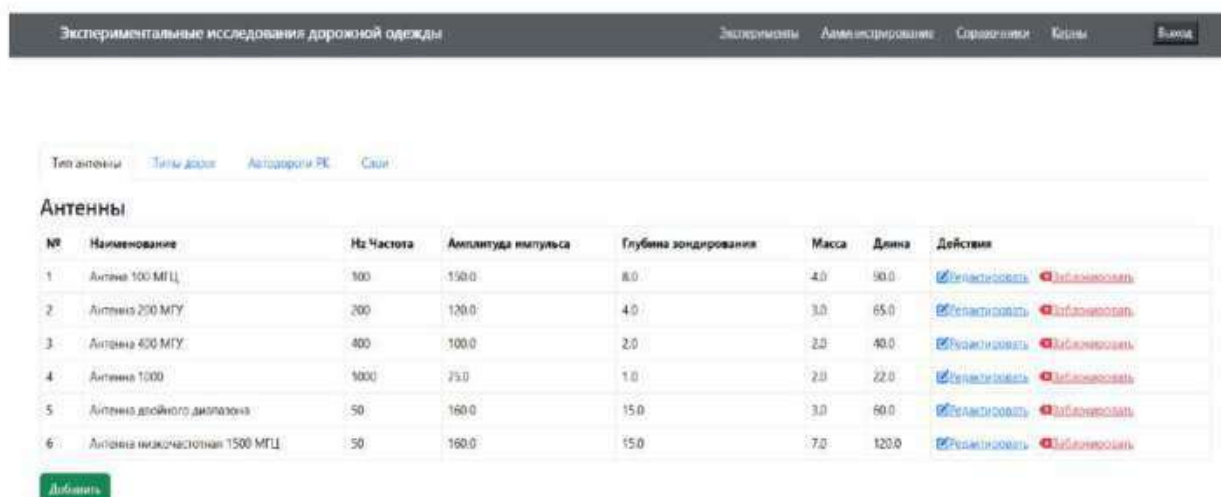


Рисунок 4.34 – Веб страница «Типы антенн»



Рисунок 4.35 – Веб страница для редактирования информации о типе антенны

На рисунке 4.36 показана Веб страница для работы с Типами дорог. На рисунке 4.37 показана страница для редактирования информации о Дорогах (добавление, редактирование).

На рисунке 4.38 представлена веб страница справочника об автодорогах РК.

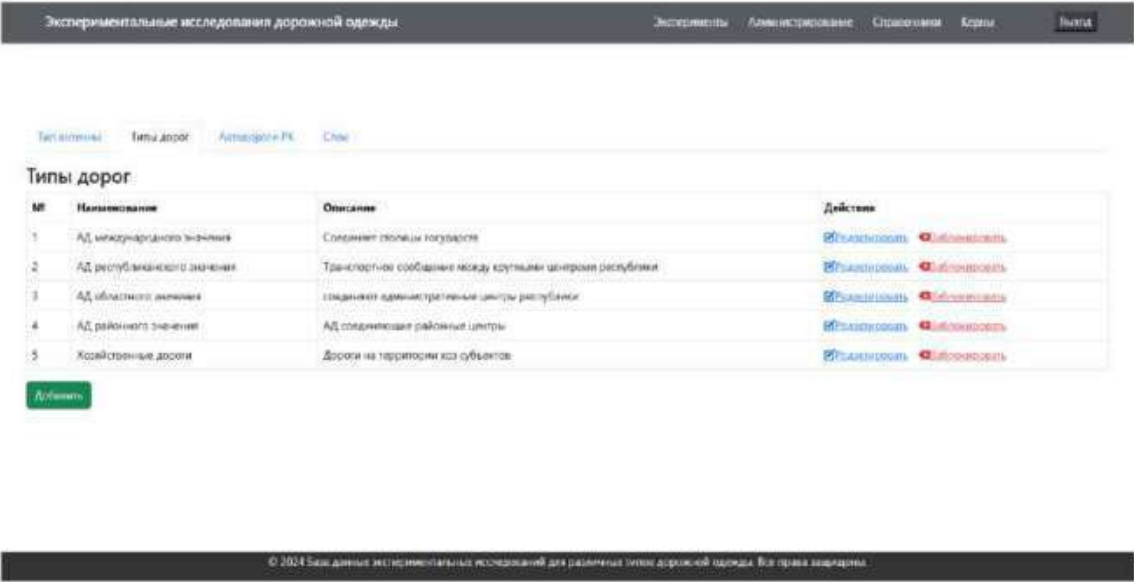


Рисунок 4.36 – Веб страницы «Типы дорог»

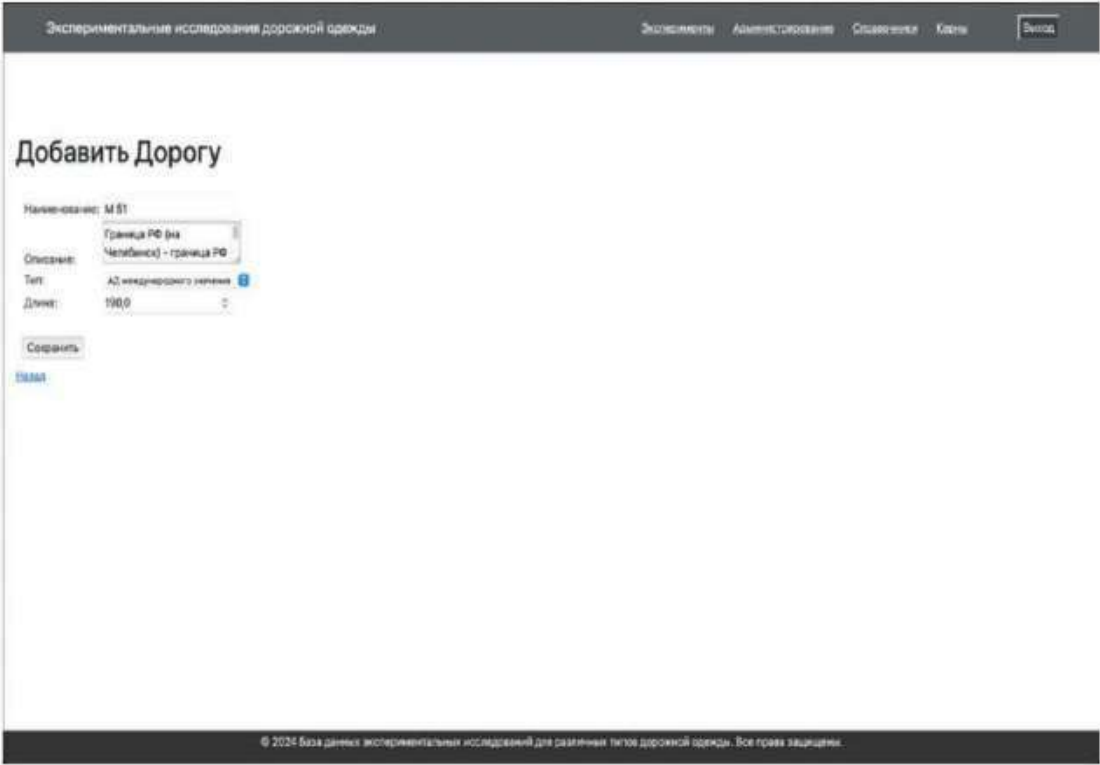


Рисунок 4.37 – Веб страницы для добавления информации о дорогах

Экспериментальные исследования дорожной одежды

Эксперименты

Администрирование

Словарники

Блоги

Выход

Типы дорожек

Типы дорог

Автодороги РК

Ссылки

Дороги

№	Наименование	Описание	Тип	Действия
1	M 32	Граница РФ (на Самару) - Шымкент, через Уралск	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
2	M 36	Граница РФ (на Екатеринбург) - Алматы, через Костанай, Астана, Караганда	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
3	M 38	Граница РФ (на Ташкент) - Майсагытсай (выход на КНР), через Павлодар, Семей	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
4	M 39	Граница РУ (на Ташкент) - Граница РУ	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
5	M 51	Граница РФ (на Челябинск) - граница РФ (на Новосибирск), через Петропавловск	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
6	A 1	Астана - Петропавловск	АД республиканского значения	Редактировать Заблокировать
7	A 2	Граница РУ (на Ташкент) - Шымкент - Тарез - Алматы - Хорбос через Кокпек	АД международного значения	Редактировать Заблокировать
8	A 3	Алматы - Усть-Каменогорск - Шымкент - граница РФ	АД республиканского значения	Редактировать Заблокировать
9	A 4	Алматы - Шымкент - Улытау - Аксайлар	АД республиканского значения	Редактировать Заблокировать
10	A 5	Асай Нурда Кольжат - граница КНР	АД международного значения	Редактировать Заблокировать

Добавить

Рисунок 4.38 – Веб страница «Дороги»

Экспериментальные исследования дорожной одежды

Эксперименты

Администрирование

Словарники

Блоги

Выход

Добавить Эксперимент

Наименование: Кювета 200

Дата:

17 2024

Тип дорожки:

мет. 300хх

Описание:

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

Сохранить

Назад

© 2024 База данных экспериментальных исследований для различных типов дорожной одежды. Все права защищены.

Рисунок 4.39 – Веб страница «Добавить Эксперимент»

114



Рисунок 4.40 – Список существующих экспериментов, с возможностью редактирования

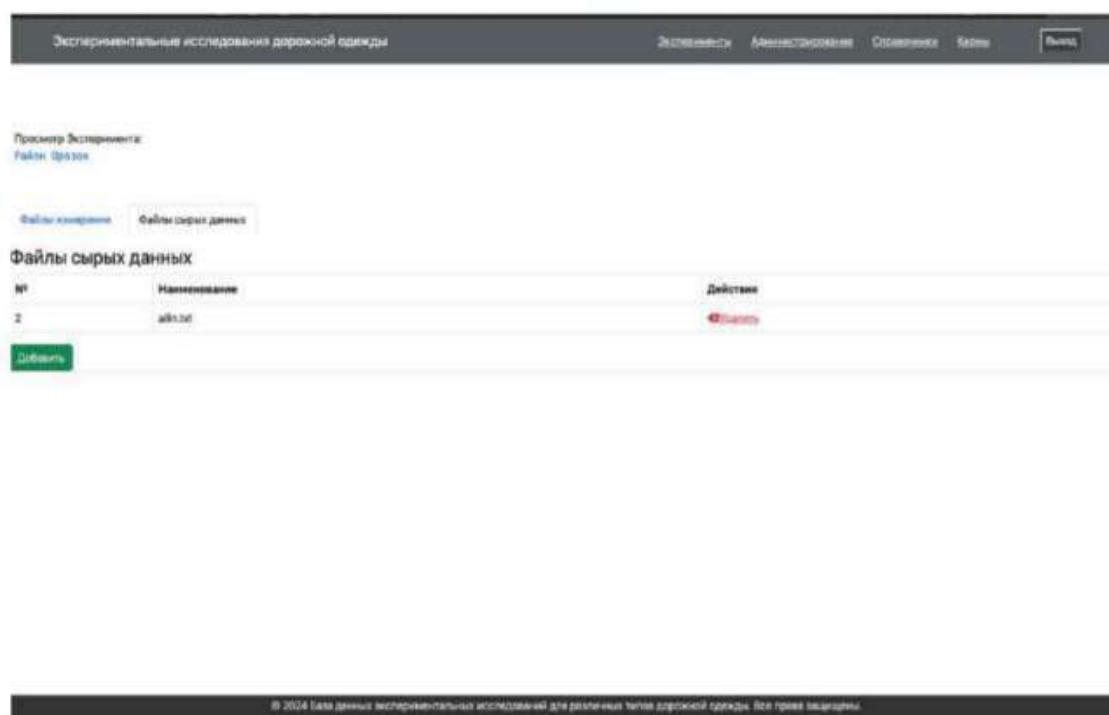


Рисунок 4.41 – Просмотр данных эксперимента, добавление файлов экспериментов

Таким образом, созданная база данных и веб-приложение обеспечивают высокую эффективность управления информацией о состоянии дорожной сети. Система облегчает доступ к данным, поддерживает их анализ и позволяет принимать обоснованные решения для повышения качества и долговечности дорожного покрытия в Казахстане. Централизованная база данных экспериментальных исследований дорожной одежды на платформе PostgreSQL, обеспечивающая полный цикл управления данными: от загрузки и хранения георадарных файлов и «сырых» откликов до ведения обработанных результатов и сведений о лабораторных

испытаниях кернов. Реализованные справочники, связи между сущностями и ролевая модель доступа позволяют поддерживать качество, целостность и прослеживаемость данных, а механизмы аудита — контролировать изменения и ответственность.

Масштабируемая схема данных и веб-интерфейс администрирования делают решение пригодным для дальнейшего расширения и интеграции в процессы мониторинга дорожной сети. В результате база данных сформировала надёжную информационную основу для научно-исследовательских и прикладных задач диагностики дорожной одежды и поддерживает принятие обоснованных инженерных решений.

Список литературы

1. Закон Республики Казахстан от 17 июля 2001 года N 245. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z010000245_ (14.09.2023).
2. Закон об архитектурной, градостроительной и строительной деятельности в Республике Казахстан. Закон Республики Казахстан от 16 июля 2001 года № 242. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z010000242_#z1 (14.09.2023).
3. Проектирование Жестких Дорожных Одежд Строительные нормы Республики Казахстан СН РК 3.03-03-2014, утверждены приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсам Министерства национальной экономики Республики Казахстан от 29 декабря 2014 года № 156-НҚ. – <https://adilet.zan.kz/rus/docs/W14156123AD> (14.09.2023).
4. Закон Республики Казахстан от 9 ноября 2004 года № 603-ІІ "О техническом регулировании" с изменениями и дополнениями по состоянию на 03.07.2013 г. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z040000603_#z1 (14.09.2023).
5. СН РК 3.03-01-2013 Автомобильные дороги – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=36922044 (14.09.2023).
6. Технический регламент "Требования безопасности при проектировании автомобильных дорог", утвержденный постановлением Правительства Республики Казахстан от 31 марта 2008 года № 307. – https://adilet.zan.kz/rus/docs/P080000307_#z2 (14.09.2023).
7. Дороги автомобильные общего пользования. ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА. Общие требования. ГОСТ Р 59120-2021 – https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR59120-21.pdf (14.09.2023).
8. Сагиндыков К.М., Кусаинова А.Т., Жусупов Т.А., Абдикаримова С.К., Аманов Р.С. «Анализ информации о параметрах и состоянии элементов дорожной одежды автомобильных трасс согласно стандартам» // Сборник материалов VIII - Международной научной конференции «Информатика и прикладная математика». Алматы, 26-27 октября 2023 г. – г. Алматы, 2023. – С. 260-266.
9. Iskakov K., Sagindykov K., Mukhambetkaliyev K., Kalmenov K., Seitkhanova A. Study of Pavement Anomalies Using GPR of OKO-

- 2 series // Material and Mechanical Engineering Technology. – №4. – Караганда, 2023. – С. 42-45.
10. Исаков К.Т., Боранбаев С.А., Дауренбеков К.К. Алгоритмы радиолокационных исследований для реальных данных георадара // Труды XIX Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем». Новосибирск, 14-22 августа 2023 г. – г. Новосибирск, 2023. С. 10-14;
 11. Кусаинова А. Т., Турарова М. К., Дауренбеков К. К., Оралбекова Ж.О., Ұзаққызы Н. Шынайы георадар деректері үшін радиолокациялық зерттеулер әдістері мен алгоритмдерін талдау // Республиканский научно – технический журнал «Университет еңбектері – Труды университета» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова». – №4 (93). – Караганда, 2023. – С. 436-441
 12. Исаков К.Т., Муканова Б.Г., Боранбаев С.А. и др. Алгоритмы и технические средства систем георадиолокации. - Астана, 2016. - 124 с.
 13. Исаков К.Т., Токсеит Д.К., Боранбаев С.А. и др. Математическое обеспечение и руководство по интерпретации георадарных данных. - Нур-Султан, 2020. - 220 с.
 14. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
 15. Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации. М.: Горная книга, 2008. -196с.
 16. Андриянов А.В. и др. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005 – 416 с.: ил.
 17. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
 18. Daubechies Ingrid, (2006): Ten Lectures on Wavelets, 9e, SIAM.
 19. Mallat Stephane, (2008): A Wavelet Tour of Signal Processing, 3e2008, Academic Press.
 20. Donoho DL. De-noising by soft-thresholding, IEEE Trans. Inform.Theory 1995;41(3):612-627.
 21. Iskakov K.T., Boranbaev S.A., Uzakkyzy, N. Wavelet processing and filtering of the radargram trace, - Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applicationsthis link is disabled, 2017, 5(4), 43–54.

22. Kussainova A.T., Boranbaev S.A., Karchevsky A.L. Optimization approach for solving the continuation problem in frequency domain // *Advanced Mathematical Models & Applications*. – 2024. – Vol. 9, №3. – P. 329-341.
23. Iskakov K., Tatin A., Glazyrina N., Kussainova A., Uzakkyzy N., Sagindykov K. Development of a discrete algorithm for interpreting ground-penetrating radar data in vertically heterogeneous media // *Applied Sciences (Switzerland)*
24. Krstić I. Design of IIR Lowpass Differentiators Based on Second-Order Allpass Filter Application. (2022) *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 41 (3), pp. 1803 - 1818
25. Kocon S., Piskorowski J. Power Line Interference Removal From Short-Latency Evoked Potentials Using Digital Time-Efficient Selective Elliptic Notch Filter. (2022) *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, art. no. 650200
26. Liu H., Yang Z., Yue Y., Meng X., Liu C., Cui J. Asphalt pavement characterization by GPR using an air-coupled antenna array. (2023) *NDT and E International*, 133, art. no. 102726
27. Batrakov D.O., Antyufeyeva M.S., Batrakova A.G., Ruban V.P. Ground Penetrating Radar Application for Positioning Cracks in Non-rigid Road Pavements. (2024) *Lecture Notes in Networks and Systems*, 803, pp. 453 – 464
28. Maruddani, Baso & Sandi, Efri. (2019). The Development of Ground Penetrating Radar (GPR) Data Processing. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 9. 768-773.
29. Jol H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Oxford: Elsevier Science, 2008, 544p.
30. Benedetto, A., Tosti, F., Ortuani, B., Giudici, M., & Mele, M. (2015). Mapping the spatial variation of soil moisture at the large scale using GPR for pavement applications. *Near Surface Geophysics*, 13(3), 269–278.
31. Pedret J, Martinez A., Perez-Gracia V. GPR spectra for monitoring asphalt pavements. "Remote sensing", 2020, vol. 12, núm. 11, p. 1749:1-1749:21
32. Anbazhagan P., Deepu-Chandran, Shashank Burman *Subsurface Imaging and Interpretation using Ground Penetrating Radar (GPR) and Fast Fourier Transformation (FFT)*. *Information Technology in Geo-Engineering*, 2014, Durham, UK, 254-259.

33. Maruddani B., Sandi E. The development of ground penetrating radar (GPR) data processing (2019) International Journal of Machine Learning and Computing, 9 (6), pp. 768 - 773
34. Duarte J., Carvalho J., Ribeiro J. Geotechnologies Applied to Anthropomorphic Structures: Use of GPR for Detection of Structural Problems, Causes and Effects - Case Study in Coimbra, Portugal. (2024) Inzynieria Mineralna, 53 (1), pp. 301 - 308
35. Parnadi W.W., Amin S.S., Heriawan M.N., Parnadi R.G. Study on the Use of Ground-Penetrating Radar Technique to Recognize Tin deposits in Bangka Island. (2019) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 318 (1), art. no. 012027
36. S. Santos-Assuncao, Tin-Wai Phoebe Wong, Wallace W.L. Lai. Optimising thresholding of bandpass filter through GPR wavelet transform in time-frequency domain. 2021 11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Page(s):1-6
37. Tan L., Jiang J. Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications, Academic Press, 2018, 920.
38. Cao Y., Labuz J. Guzina B. Evaluation of pavement system based on ground-penetrating radar full-waveform simulation. Transportation Research Record, 2018, 2227, 71–78p.
39. Richard G. Lyons, D. Lee Fugal The Essential Guide to Digital Signal Processing (Essential Guide Series), 2014 Pearson Education, Inc. 6207p.
40. Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. – Ed. 2nd. - London, 2004. - 728 p.
41. Старовойтов А.В., Ермаков А.П. Применение метода георадиолокации в инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологических условий // Вестник Московского университета. - 2010. - №6. - С. 91-96.
42. Александров П.Н. Теоретические основы георадарного метода. - М., 2017. - 112 с.
43. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: учеб. пос. - М.: Изд-во МГУ, 2004. - 153 с.
44. Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований. - М.: ГСД Продакшен, 1997. - 65 с.
45. Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Интерпретация результатов георадиолокационного зондирования массива горных пород с

- использованием цифрового изображения // Горная промышленность. - 2023. - №5S. - С. 119-124.
46. Annan A.P. Ground Penetrating Radar: principles, procedures and applications. - Mississauga, 2003. - 278 p.
 47. Jol H.M. Ground Penetrating Radar: theory and applications / ed. - Amsterdam: Elsevier, 2009. 544 p.
 48. Тихонов А.Н. Об устойчивости обратных задач // ДАН СССР.- 1943.-т.39, № 5-С.195-198.
 49. Тихонов А.Н. О единственности решения задачи электроразведки// ДАН СССР.-1949.-Т.69, № 6.-С. 797-800.
 50. Лаврентьев М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики. - Новосибирск: Наука, 1962. – 91 с.
 51. Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. Некорректные задачи математической физики и анализа. // Новосибирск: Наука, 1980. – 285 с.
 52. Романов В.Г. Обратные задачи для дифференциальных уравнений. – Новосибирск: НГУ, 1973. – 88 с.
 53. Романов В.Г. Обратные задачи математической физики. –М. Наука, 1984. -264 с.
 54. Романов В.Г., Кабанихин С.И. Обратные задачи геоэлектрики. - М.:Наука, 1991. – 303с.
 55. Кабанихин С.И., Искаков К.Т. Оптимизационные методы решения коэффициентных обратных задач. – Новосибирск, 2001. – 316 с.
 56. Романов В. Г. Некорректные задачи математической физики. — Новосибирск: Наука, 2002. — 176 с.
 57. Romanov, V.G. A stability estimate for a solution to a three-dimensional inverse problem for the Maxwell equations. *Siberian Mathematical Journal*, 45(6), 1098–1112 (2004).
 58. Kabanikhin S. I., Iskakov K. T. Optimization Methods of Solving Inverse Hyperbolic Problems. *Novosibirsk State University*, 2007, ~230 pp.
 59. Искаков К.Т., Муканова Б.Г., Боранбаев С.А. и др. Алгоритмы и технические средства систем георадиолокации. - Астана, 2016. - 124 с.
 60. Искаков К.Т., Токсеит Д.К., Боранбаев С.А. и др. Математическое обеспечение и руководство по интерпретации георадарных данных. - Нур-Султан, 2020. - 220 с.

61. Rysbaiuly B., Baymankulov A. T., Variational-difference method for determining the diffusion coefficient of soil water; *Int. J. Acad. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 84–91, 2010.
62. Rysbaiuly B., Akishev T. B., Calculation of the heat capacity and heat transfer coefficients of multilayer ground considering data from the Earth surface; *Asian J. Nat. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 5–17, 2012.
63. Karchevsky A. L., Correct procedure for numerical solution of an inverse problem by the optimization method; *Sib. Electron. Math. Rep.*, vol. 5, pp. 609–619, 2008. [Online]. Available: <http://semr.math.nsc.ru/v5/p609-619.pdf>.
64. Yelf R. Where is true time zero? // *Proceed. of the 10th internat. conf. on Grounds Penetrating Radar (GPR 2004)*. - Delft, 2004. – P. 279-282.
65. Zatar W.A., Nghiem H., Nguyen H. Detecting Reinforced Concrete Rebars Using Ground Penetrating Radars // *Applied Sciences*. - 2024. - Vol. 14, №13. - P. 5808-1-5808-17.
66. Łaziński P. et al. GPR in Damage Identification of Concrete Elements - A Case Study of Diagnostics in a Prestressed Bridge // *Remote Sensing*. - 2025. - Vol. 17, №1. - P. 35-1-35-21.

Приложение А

Экспериментальные исследования с использованием георадара «ОКО-2» и примеры интерпретированных радарограмм

Работы выполнялись совместно со специалистами Национального центра качества дорожных активов (НЦКДА) в соответствии с утверждённым календарным планом. Для каждого обследуемого маршрута осуществлялись предварительная калибровка антенных блоков, трассировка профилей, GPS-привязка координат и оперативный контроль корректности регистрации сигналов. В период 2023–2025 гг. были зарегистрированы свыше 4000 георадарных трасс и файлов измерений, что позволило сформировать базу экспериментальных данных для последующего анализа.

Целью экспериментальных исследований является получение реальных георадиолокационных данных для различных типов дорожной одежды с последующим сравнением с результатами численного моделирования и лабораторных измерений.

Основные задачи:

- выполнение обследований автомобильных дорог с применением георадара серии «ОКО»;
- анализ влияния конструктивных и физико-механических свойств дорожной одежды на параметры отражённого сигнала;
- формирование базы данных измерений для последующей интерпретации и проверки численных моделей.

В таблице 1 приведены сводка всех экспериментов проведенные за 2023–2025 года.

Таблица 1 - сводка всех экспериментов проведенные за 2023–2025 года.

№	Название трассы	Протяже- нность, км	Количе- ство Файлов	Испль- зуемые анте- нны	Дата проведения
2023 год					
1	Восточный обход г. Астана – ст. Сарыюба	23-41км	16	400 МГц, 1000 МГц	Август
2	Астана – Коргалжын с подъездом к Коргалжынскому заповеднику	49- 51км	10	400 МГц, 1000 МГц	Август
3	Астана – Кабанбай батыр	38 км	76.	40 0МГц, 1000 МГц	Сентябрь
4	Энтузиаст(Ахметауыл)- Киевка(Нура)	18 км	36	400 МГц, 1000 МГц	Октябрь
2024 год					
1	на участке республиканской автомобильной дороги Р-2 Астана – Коргалжын до поселка Сабынды и обратно	260 км	520	400 МГц, 1000 МГц	Май
2	Сабынды –Коргалжын, Коргалжын – Сабынды	108 км	216	400 МГц, 1000 МГц	Май
3	Астана - Кокшетау , Астана - Макинка	350 км	1886	400 МГц, 1000 МГц	Августа
4	Макинка - Кокшетау	174км	348	400 МГц, 1000 МГц	Сентябрь
2025 год					
1	По маршруту Астана - Нура(Киевка)- Темиртау-Караганда	179 км.	358	400 МГц, 1000 МГц	Июнь
2	Астана -Нура - Осакаровка	82 км	164	400 МГц, 1000 МГц	Июль
3	М-36 Алматы — Екатеринбург от города Караганды до города Астаны.	215 км	710	400 МГц, 1000 МГц	Август
4	М-36 Алматы — Екатеринбург от города Астаны до города Караганда	215км	1025	400 МГц, 1000 МГц	Август

Полученные данные сохранялись в формате `gpr2`, обработка велась в «Дорого Про». Обработка полученных данных была проведена с помощью разработанного в рамках проекта программного обеспечения (см. раздел 9).

Для каждой трассы проведено сопоставление полученных радарограмм с данными визуального обследования и лабораторных испытаний кернов.

Проведённые в 2023–2025 гг. двенадцать экспедиций позволили сформировать базу георадиолокационных данных различных типов дорожных конструкций.

Подготовка оборудования и маршрутов георадиолокационного обследования

Перед началом обследования выполняется калибровка и настройка георадиолокационного оборудования, включая установку глубины зондирования, усиления сигнала, временной задержки и частоты дискретизации. Антенные блоки проверяются на предмет герметичности, целостности соединений и плотности контакта с поверхностью (для контактных антенн). Также производится тестирование программного обеспечения на корректность отображения трасс, синхронизацию с позиционирующими модулями (GPS, одометр), а также функционирование систем записи и экспорта данных. Работы рекомендуется проводить в благоприятных погодных условиях — при температуре воздуха от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+25^{\circ}\text{C}$, в сухую погоду, без осадков и обледенения покрытия. Начальные условия на участке (включая визуальные ориентиры и состояние поверхности) фиксируются посредством фото- или видеорегистрации.

Планирование маршрутов обследования включает трассировку параллельных линий с постоянным шагом (обычно 0,5–1 м) вдоль обследуемой полосы. Для пространственной привязки данных применяются системы глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС), обеспечивающие географическую координатную фиксацию каждой трассы. В условиях ограниченного доступа или в закрытых помещениях используется одометрическая привязка — с помощью колеса с датчиком пути, синхронизированного с системой сбора данных. При отсутствии автоматических средств позиционирования возможна ручная разметка участка с регистрацией ключевых точек и привязкой данных по расстоянию.

Выбор антенных блоков

Выбор антенных блоков диапазона 400–700 МГц в георадарных системах «ОКО» обусловлен необходимостью достижения оптимального баланса между глубиной зондирования и разрешающей способностью при обследовании дорожных конструкций. Антенны этого диапазона обеспечивают проникновение электромагнитной волны до 4–6 м, что позволяет исследовать всю толщу конструктивных слоёв дорожной одежды и верхнюю часть земляного полотна без существенной потери качества сигнала.

Частоты 400–700 МГц обеспечивают высокую детализацию радарограмм, что особенно важно при выявлении трещин, зон переувлажнения, локальных разуплотнений, расслоений и пустот, влияющих на несущую способность дорожного покрытия. Благодаря повышенной чувствительности

к мелкомасштабным неоднородностям данный частотный диапазон позволяет получить точные данные о структуре и текущем состоянии дорожной конструкции.

Выбор именно антенных блоков 400–700 МГц для настоящего исследования обусловлен задачей диагностировать дефекты верхних и промежуточных слоёв дорожной одежды с достаточной точностью, сохраняя при этом возможность регистрации отражений от более глубоких границ, что делает данный диапазон наиболее эффективным для оценки эксплуатационного состояния автомобильных дорог

Экспериментальные исследования на участке «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба» Август 2023 год.

Полевые испытания проведены с целью экспериментальной верификации георадарных методов диагностики конструктивных слоёв дорожной одежды на участке капитального ремонта автомобильной дороги М-6 «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба». Исследование направлено на определение толщин слоёв основания и покрытия, а также выявление зон неоднородности и дефектов дорожной конструкции.

Объект обследования — участки капитального ремонта автомобильной дороги «Восточный обход г. Астана – ст. Сарыоба» протяжённостью:

участок I: км 0–23;

участок II: км 23–41.

Работы выполнены в ходе выезда полевой экспедиции с регистрацией георадарных данных. Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Сагындыков К.М., Боранбаев С.А.



Рисунок 1 - Начало полевого эксперимента

Измерения выполнялись по уложенным конструктивным слоям дорожной одежды, включающим:

Нижний слой основания — щебёночно-песчаная смесь С4;

Верхний слой основания — щебёночно-песчаная смесь С6, обработанная портландцементом М-400 (7 % по массе);

Нижний слой покрытия — горячий крупнозернистый пористый асфальтобетон марки П.



Рисунок 2 - Объекты исследования участок I и II

Перед началом съёмки выполнена калибровка антенн на эталонном участке с известными параметрами слоёв. Георадарные трассы проложены продольно по оси движения и поперечно на реперных линиях для уточнения пространственной неоднородности. Длина одного профиля составляла около 50 м при шаге 0,03 м по трассе.

Синхронизация и геопривязка осуществлялась с использованием GPS-приёмника, встроенного в систему сбора данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

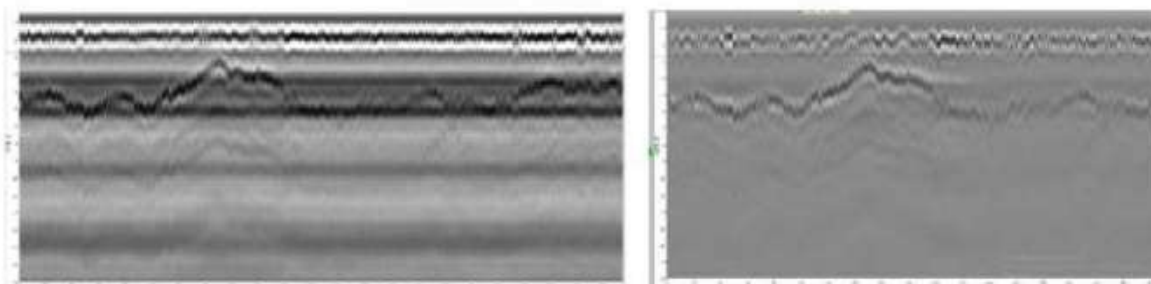


Рисунок 3 - Полученные радарограммы до обработки

Полученные 36 файлов георадарных данных обеспечивают основу для последующего численного анализа, построения разрезов и верификации разработанных алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Экспериментальные исследования на участке а/д Р-2 «Астана – Коргалжын с подъездом к Коргалжынскому заповеднику» Август 2023 год.

Целью экспериментального исследования являлась оценка амплитудно-частотных характеристик сигналов в песчаных слоях для последующего анализа диэлектрических свойств и параметров распространения электромагнитных волн.

Для уточнения физических характеристик подстилающего основания был проведён выезд на песчаные карьеры в районе посёлка Сабынды, Коргалжынского района Акмолинской области, где осуществлялась дополнительная съёмка контрольных песчаных слоёв. Данный участок характеризуется однородной структурой песчаного массива с чётко выраженными горизонтальными слоями, что позволяет моделировать распространение электромагнитных волн в средах с различной степенью влажности и плотности.

Экспериментальные исследования проводились при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К. Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Сагындыков К.М., Боранбаев С.А.



Рисунок 4 - Начало полевого эксперимента на песчанном карьере

Исследования проводились на участках с частично разрушенным покрытием и визуально деформированным основанием. Структура дорожной одежды в обследуемых зонах включает подстилающий слой — песчаное основание естественного залегания. Контрольные измерения в карьере Сабынды позволили зафиксировать эталонные сигналы сухого песка с известной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4.5 \pm 0.5$.



Рисунок 5 - Объект исследование карьер Сабынды

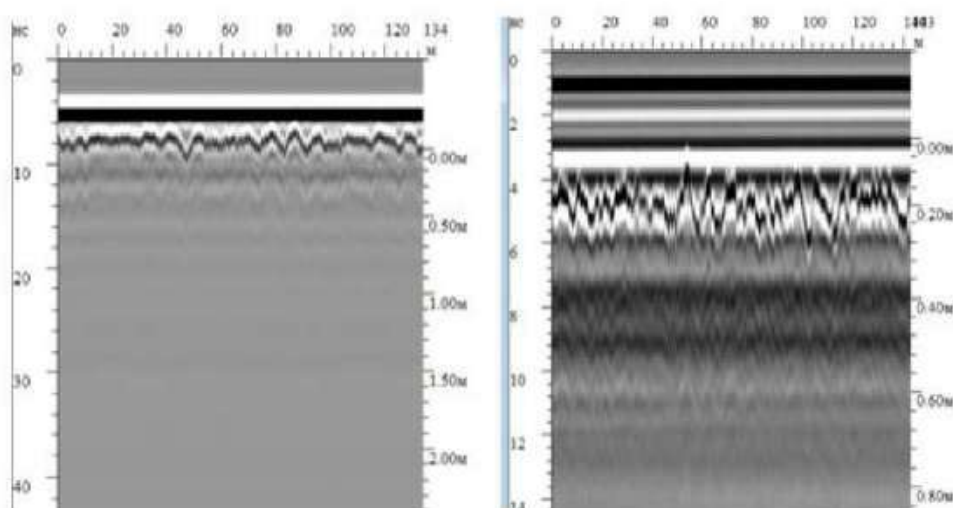


Рисунок 6 - Полученные радарограммы до обработки

Полученные 10 файлов георадарных данных обеспечивают основу для последующего численного анализа, построения разрезов и верификации разработанных алгоритмов цифровой обработки сигналов.

Экспериментальные исследования на участке А-1 «Астана — Кабанбай батыр» Сентябрь 2023 год.

Полевые испытания проведены с целью экспериментальной верификации георадарных методов диагностики конструктивных слоёв дорожной одежды. Исследования осуществлялись на участке автомобильной дороги республиканского значения А-1 «Астана – Кабанбай батыр».

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Искаков К.Т., Татин А.А.



Рисунок 7 - Состав исследовательской группы

Выбор данного участка обусловлен наличием различных по характеру дефектов покрытия, что позволяет оценить эффективность применения георадарного комплекса для выявления скрытых неоднородностей в толще дорожной конструкции. Полевые измерения выполнялись в местах с визуально фиксируемыми повреждениями покрытия (продольные и поперечные трещины, ямочность, локальные разрушения верхнего слоя).



Рисунок 8 - Объекты исследования

Георадарные профили прокладывались вдоль продольной оси дороги и поперечных сечений в зонах повышенной дефектности.

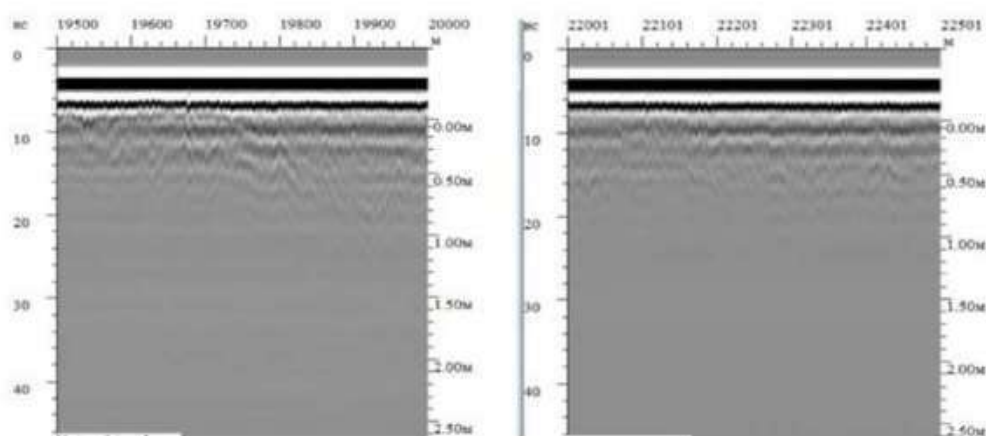


Рисунок 9 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 76 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Экспериментальные исследования на участке Р-2 Энтузиаст (Ахметауыл)- Киевка (Нура). Октябрь 2023 год.

Полевые испытания проведены с целью экспериментальной верификации георадарных методов диагностики конструктивных слоёв дорожной одежды. Исследования осуществлялись на участке автомобильной дороги республиканского значения Энтузиаст (Ахметауыл) - Киевка (Нура). Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Сагындыков К.М., Татин А.А., Касенгалиев Д.



Рисунок 10 - Маршрут исследования на участке Р-2 Энтузиаст (Ахметауыл)- Киевка (Нура) и состав исследовательской группы

Выбор данного участка обусловлен наличием различных по характеру дефектов покрытия, что позволяет оценить эффективность применения георадарного комплекса для выявления скрытых неоднородностей в толще дорожной конструкции. Полевые измерения выполнялись в местах с визуально фиксируемыми повреждениями покрытия (продольные и поперечные трещины, ямочность, локальные разрушения верхнего слоя).



Рисунок 11- Объекты исследование

Георадарные профили прокладывались вдоль продольной оси дороги и поперечных сечений в зонах повышенной дефектности. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

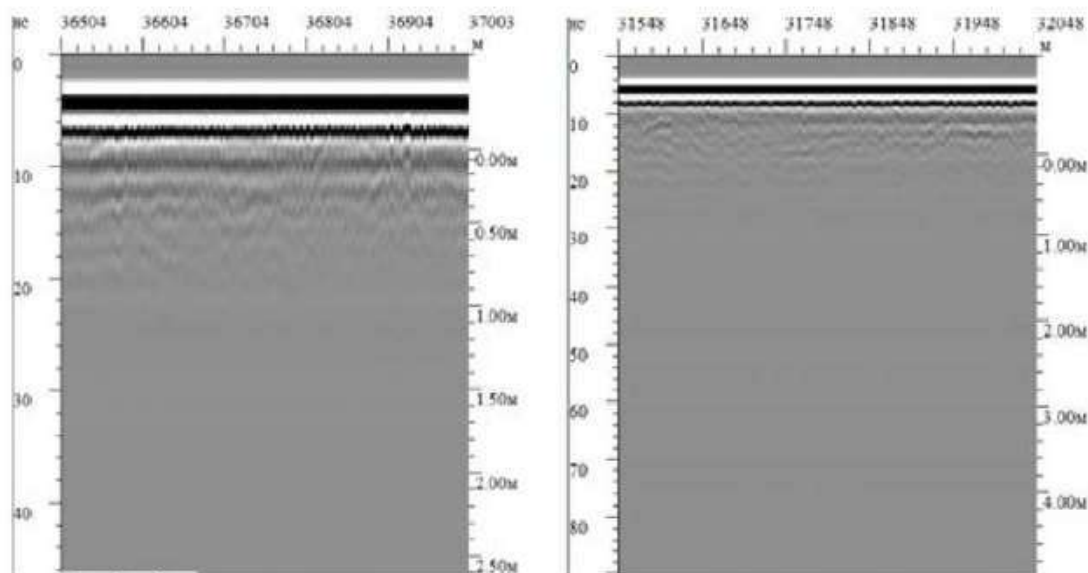


Рисунок 12 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 36 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги Р-2 Астана – Коргалжын до поселка Сабынды и обратно. Май 2024 год.

Целью эксперимента являлось проведение полевых георадарных исследований на участке республиканской автомобильной дороги Р-2 «Астана – Коргалжын» (до посёлка Сабынды и обратно) для оценки состояния конструктивных слоёв дорожной одежды и выявления скрытых дефектов в основании и покрытии.

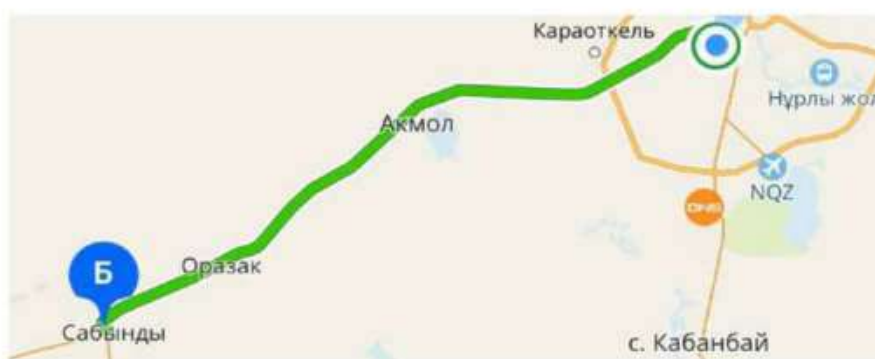


Рисунок 13- Схема автодороги Астана – Сабынды

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К. Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Искаков К.Т. Боранбаев С.А. Татин А.А., Касенгалиев Д.



Рисунок 14 - Начальное и конечное пункты исследования

Исследование проводилась с остановками на всем протяжении дороги, визуально осматривая состояние покрытия дороги. При этом местоположение водопропускных труб (рис. 16), дефектов, деформаций и разрушений (рис. 17) записывались по показанию датчиков перемещения пройденного пути системы «Дорога ПРО» в километрах, относительно от точки начала исследования. Визуально фиксировались местоположение 274

разрушений дорожного покрытия. Особо сильные разрушения дорожного покрытия фотографировались.



Рисунок 15 - Водопропускная труба



Рисунок 16 - Разрушения дорожного покрытия

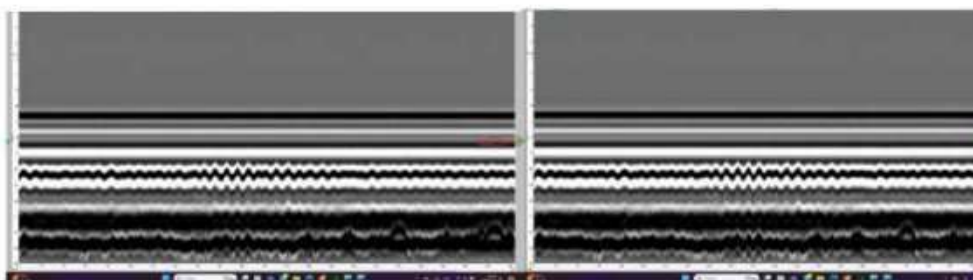


Рисунок 17 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 520 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Отдельные георадарные файлы содержат информацию о внутреннем строении и состоянии дорожных конструкций в определенных сечениях дороги.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги Р-1 Астана- Сабынды –Коргалжын и обратно. Май 2024 год.

Целью эксперимента являлось проведение полевых георадарных исследований на участке республиканской автомобильной дороги Р-1 «Астана – Сабынды – Коргалжын» (в обоих направлениях) с целью оценки технического состояния конструктивных слоёв дорожной одежды и выявления скрытых дефектов основания.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К. Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Сагындыков К.М., Татин А.А., Бешеев Д.



Рисунок 18 - Схема автодороги Р-1 Астана- Сабынды –Коргалжын и состав исследовательской группы

Задача экспериментального исследования, сбор и анализ информации о состоянии элементов дорожной одежды проводилась на участке Республиканской автомобильной дороги.

На представленных (рис. 19) рисунках зафиксированы повреждения верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, характерные для участков с признаками деградации дорожной конструкции.

Совокупность представленных дефектов свидетельствует о неоднородности физико-механических свойств дорожного полотна, наличии скрытых зон переувлажнения и ослабления несущей способности, что требует проведения глубинной георадарной диагностики для определения степени разрушений и уточнения структуры конструктивных слоёв.



Рисунок 19 - Разрушения дорожного покрытия

Георадарные профили прокладывались вдоль продольной оси дороги и поперечных сечений в зонах повышенной дефектности. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

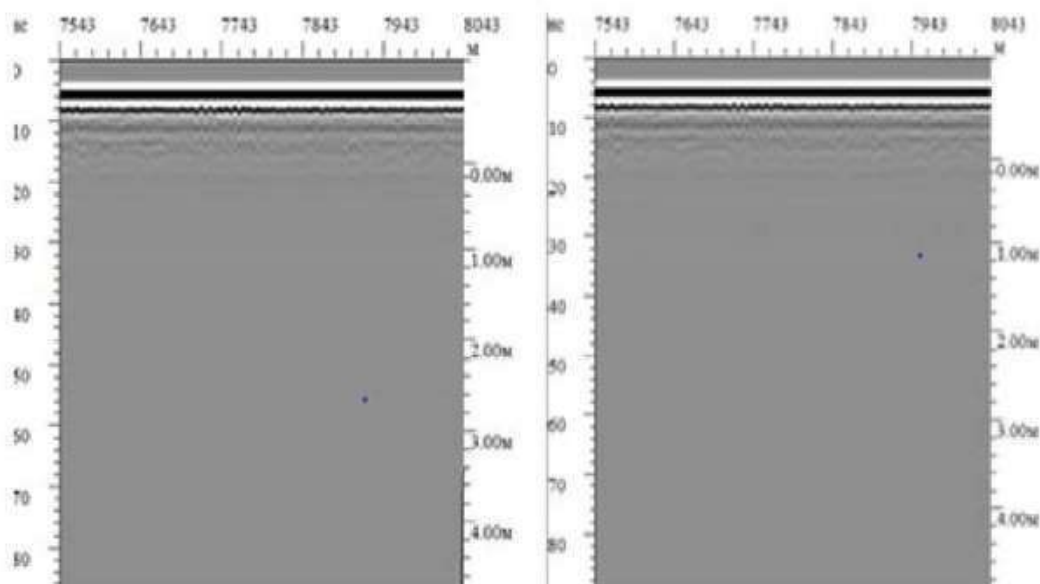


Рисунок 20 - Полученные радарограммы до обработки

В ходе полевых работ было получено 216 файлов георадарных измерений, при этом географические координаты каждой трассы фиксировались с использованием GPS-приёмника.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги А-1 Астана - Кокшетау - Макинка и обратно. Август 2024 год.

Целью эксперимента являлось проведение полевых георадарных исследований на участке республиканской автомобильной дороги А-1 «Астана – Кокшетау – Макинка» (в обоих направлениях) с целью оценки технического состояния конструктивных слоёв дорожной одежды и выявления скрытых дефектов основания и покрытия.

Основными задачами эксперимента являлись регистрация георадарных профилей на участках с различными типами дефектов покрытия, определение толщины и структуры конструктивных слоёв дорожной одежды, а также выявление зон переувлажнения, разуплотнения и снижения несущей способности основания.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Татин А.А.



Рисунок 21- Схема автодороги А-1 Астана - Кокшетау - Макинка и состав исследовательской группы

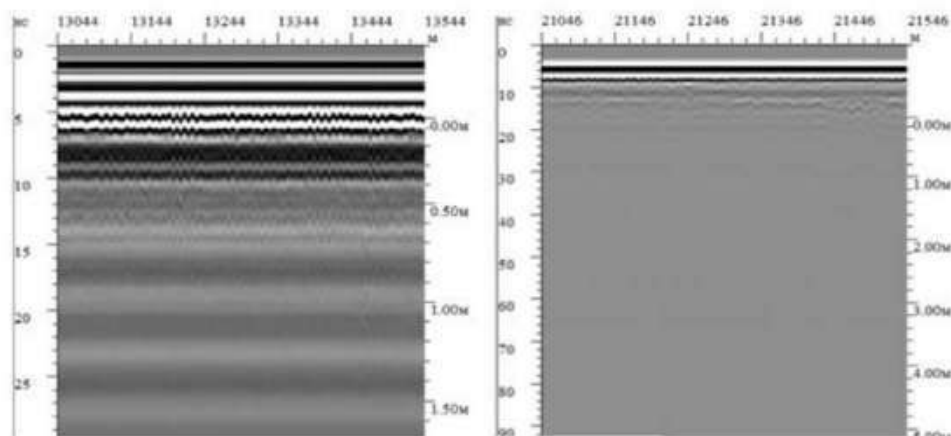


Рисунок 22 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 1886 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги А-1 Макинка - Кокшетау и обратно. Сентябрь 2024 год.

Целью эксперимента являлось проведение георадарных исследований на участке республиканской автомобильной дороги А-1 «Макинка – Кокшетау» в обоих направлениях для оценки состояния конструктивных слоёв дорожной одежды и выявления скрытых дефектов основания.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Татин А.А.



Рисунок 23 - Схема автодороги А-1 Макинка - Кокшетау и обратно. и состав исследовательской группы

В ходе эксперимента зафиксированы повреждения асфальтобетонного покрытия, типичные для участков с пониженной несущей способностью основания.

На (Рис 24) наблюдаются продольные и сетчатые трещины, а также частичное разрушение кромки проезжей части. Такие дефекты указывают на усталостное разрушение материала покрытия, вызванное повторными динамическими нагрузками и проникновением влаги в нижние слои и участок с локальными выбоинами и шелушением верхнего слоя асфальта, что свидетельствует о разуплотнении основания и потере адгезии между слоями покрытия. Совокупность выявленных дефектов указывает на неравномерное распределение нагрузок и переувлажнение дорожного полотна, что требует детальной георадарной диагностики для определения глубины и характера разрушений конструктивных слоёв дороги.



Рисунок 24 - Разрушения дорожного покрытия

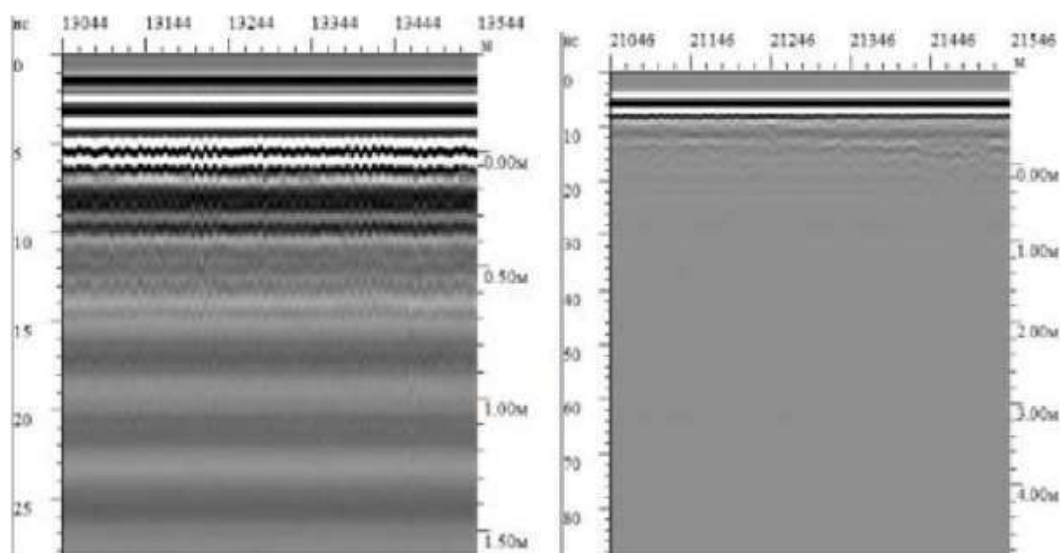


Рисунок 25 - Полученные радарограммы до обработки

В ходе полевых работ было получено 348 файлов георадарных измерений, при этом географические координаты каждой трассы фиксировались с использованием GPS-приёмника. Выбор данного участка был обусловлен наличием разнообразных по типу и степени выраженности дефектов дорожного покрытия, что позволило провести оценку эффективности применения георадарного комплекса для обнаружения скрытых неоднородностей в слоях дорожной конструкции.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги Астана - Нура (Киевка)-Темиртау — Караганда. Июнь 2025 год.

Объект обследования фрагменты автодороги республиканского значения общей протяжённостью 179 км по указанному маршруту. Участки включали как асфальтобетонное покрытие, так и гравийное основание.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Искаков К.Т., Жансеитова А.М., Касенгалиев Д.



Рисунок 26 - Схема автодороги Астана -Нура (Киевка)-Темиртау — Караганда и состав исследовательской группы

Георадарные профили регистрировались как на участках с асфальтобетонным покрытием, так и на отрезках с гравийным основанием. Это позволило сравнить структуру и состояние дорожной одежды в зависимости от типа покрытия, а также выявить скрытые дефекты основания, пустоты и зоны переувлажнения. В ходе исследования был зафиксирован участок дорожного покрытия (асфальтобетон). По всей ширине полотна заметна продольно-поперечная трещина сложной конфигурации. Трещина имеет зигзагообразный характер, переменную ширину (от микротрещины до 2–3 мм), местами сопровождается осыпью мелких гранул минерального материала. Поверхность асфальтобетона в целом сохранила целостность, но наличие трещины свидетельствует о начавшихся деформационных процессах основания или верхнего слоя покрытия.



Рисунок 27 - Дорожное покрытия с дефектом

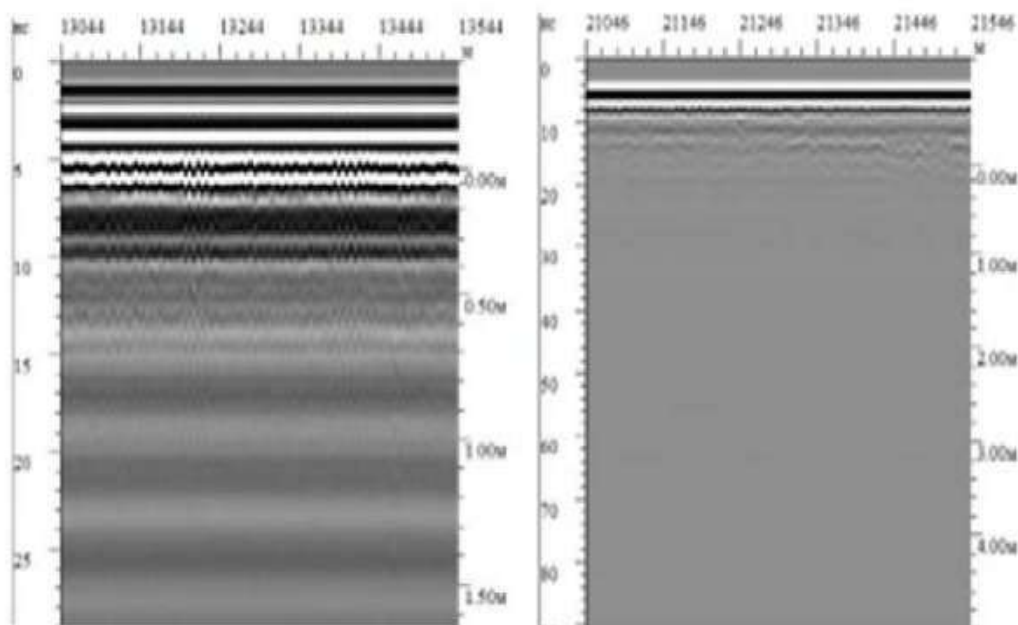


Рисунок 28 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 358 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Экспериментальные исследования на участке республиканской автомобильной дороги Астана -Нура -Осакаровка. Июль 2025 год.

Объект обследования фрагменты автодороги республиканского значения общей протяжённостью 82 км по указанному маршруту. Участки включали как асфальтобетонное покрытие, так и гравийное основание.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Исаков К.Т., Жансеитова А.М., Касенгалиев Д.



Рисунок 29 - Схема автодороги Астана -Нура -Осакаровка и состав исследовательской группы

Георадарные профили регистрировались как на участках с асфальтобетонным покрытием, так и на отрезках с гравийным основанием. Это позволило сравнить структуру и состояние дорожной одежды в зависимости от типа покрытия, а также выявить скрытые дефекты основания, пустоты и зоны переувлажнения.

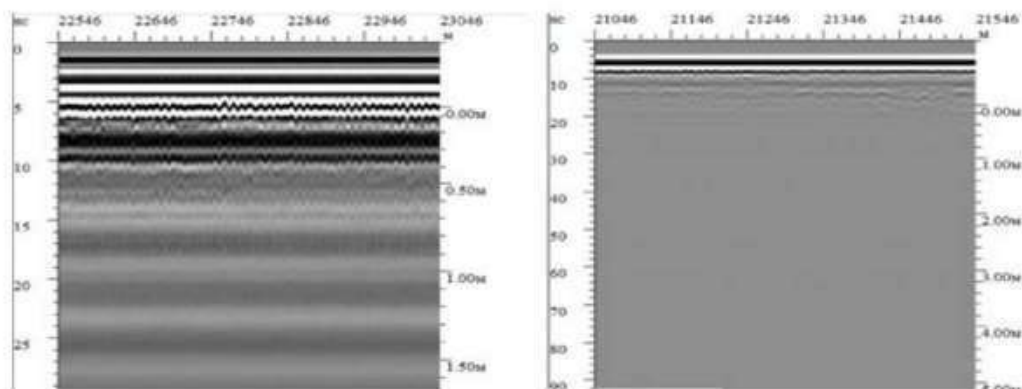


Рисунок 30 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 164 файла георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника.

Экспериментальные исследования на участке международный автомобильной дороги М-36 Алматы — Екатеринбург от города Астаны до города Караганды. Август 2025 год.

Объект обследования фрагменты автодороги международного значения общей протяжённостью 215 км по указанному маршруту. Участки включали как асфальтобетонное покрытие.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К.Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Сагындыков Х.М., Боранбаев С.А.



Рисунок 31 Схема международный автомобильной дороги М-36 Алматы — Екатеринбург от города Астаны до города Караганды и состав исследовательской группы

Эксперимент проводился с использованием передвижной дорожно-диагностической лаборатории Национального центра качества дорожных активов, оснащённой современным георадарным оборудованием. Комплекс предназначен для бесконтактного зондирования дорожного полотна и обеспечивает получение данных о толщине и структуре конструктивных слоёв покрытия, а также о состоянии верхней части основания. Исследования выполнялись в режиме непрерывного движения транспортного средства, что позволило оперативно обследовать протяжённые участки автомобильной дороги с высокой точностью и производительностью.

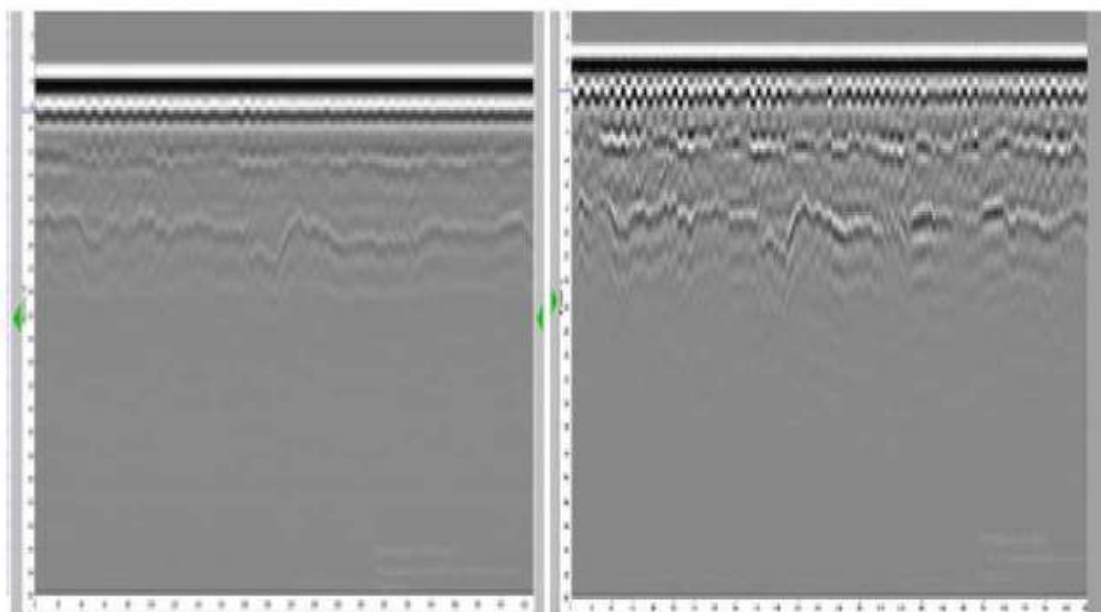


Рисунок 32 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 710 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника. *Отдельные георадарные файлы содержат информацию о внутреннем строении и состоянии дорожных конструкций в определенных сечениях дороги.*

Экспериментальные исследования на участке международной автомобильной дороги М-36 Алматы — Екатеринбург от города Караганды до города Астаны. Август 2025 год.

Объект обследования фрагменты автодороги международного значения общей протяжённостью 215 км по указанному маршруту. Участки включали как асфальтобетонное покрытие.

Экспериментальные исследования проводился при участии ведущего эксперта отдела диагностики, мониторинга безопасности дорожной инфраструктуры К. Б. Калменовым Национального центра качества дорожных активов.

Состав экспедиционной группы: Сагындыков Х.М., Боранбаев С.А.



Рисунок 33 Схема международной автомобильной дороги М-36 Алматы — Екатеринбург от города Караганды до города Астаны и состав исследовательской группы

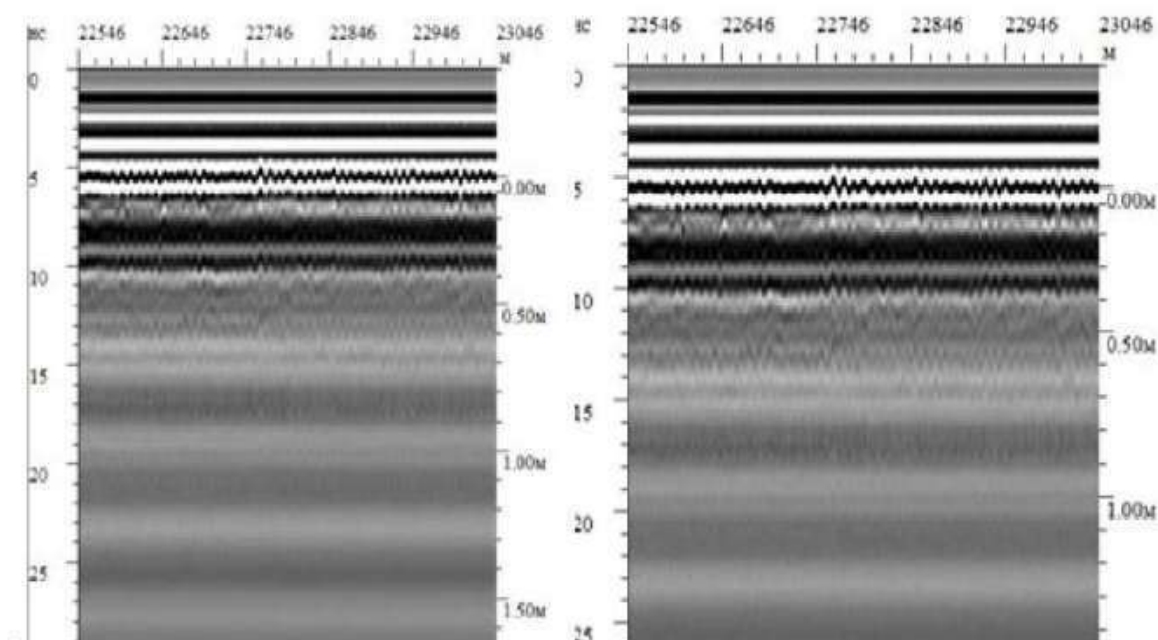


Рисунок 34 - Полученные радарограммы до обработки

Получено 710 файлов георадарных данных. Географические координаты каждого измерения фиксировались с помощью GPS приемника. Отдельные георадарные файлы содержат информацию о внутреннем строении и состоянии дорожных конструкций в определенных сечениях дороги.

Приложение Б

Схема базы данных

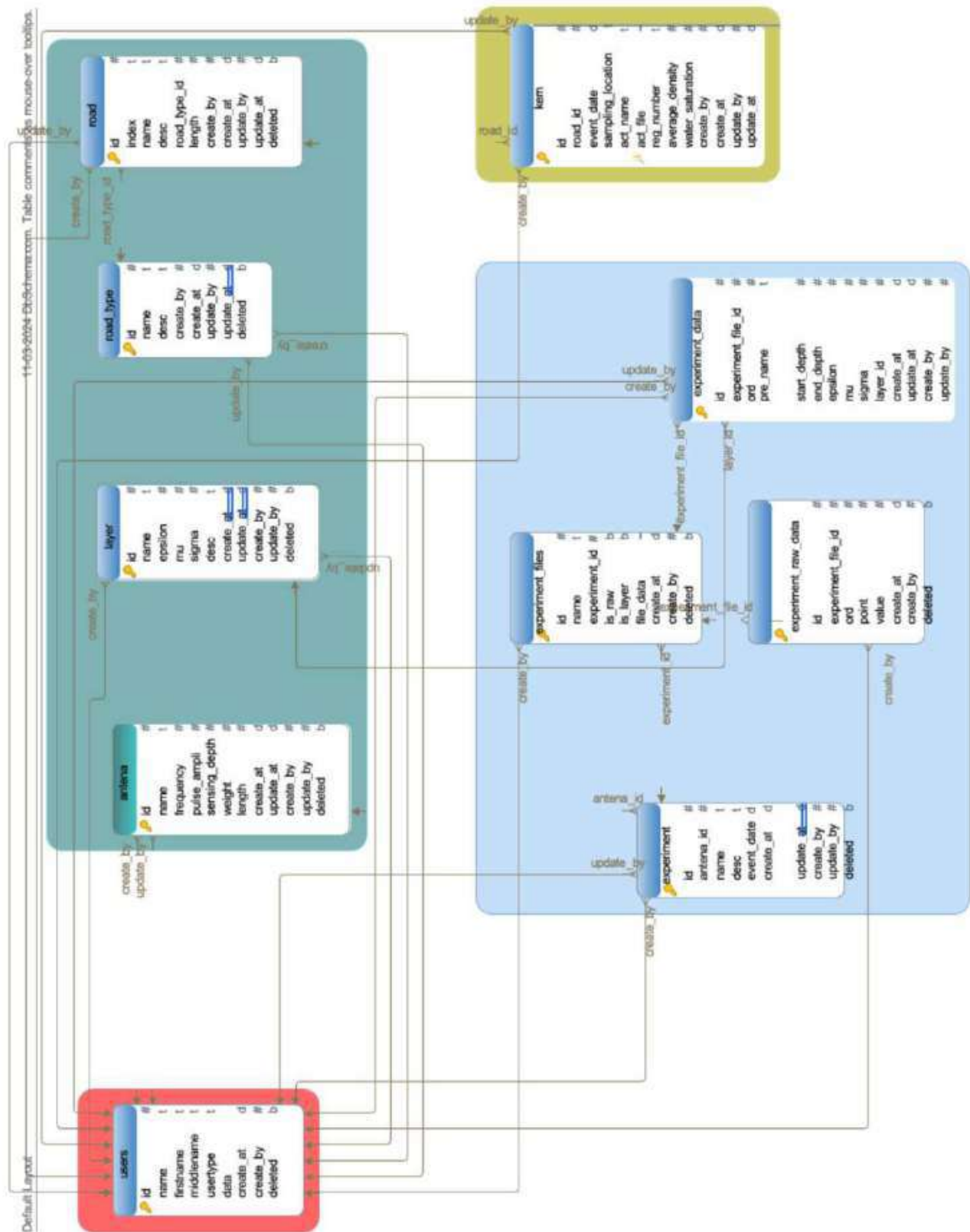


Table antenna			
* Pk	id	bigint	
*	name	varchar(300)	
*	frequency	integer	Hz
*	pulse_ampli	double precision	
*	sensing_depth	double precision	
*	weight	double precision	
	length	integer	cm
*	create_at	timestamp	
*	update_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	update_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_antena_id	id	
Foreign Keys			
	fk_antena_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_antena_users (update_by) ref users (id)		

Table experiment			
* Pk	id	bigint	
*	antena_id	bigint	
*	name	varchar(500)	
	desc	text	
*	event_date	date	
*	create_at	timestamp	
*	update_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	update_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_experiment_id	id	
Foreign Keys			
	fk_experiment_users_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_experiment_users_upd (update_by) ref users (id)		
	fk_experiment_antena (antenna_id) ref antenna (id)		

Table experiment_data			
* Pk	id	bigint	
*	experiment_file_id	bigint	
*	ord	integer	
*	pre_name	varchar(300)	
*	start_depth	double precision	
	end_depth	double precision	

Table experiment_files			
* Pk	id	bigint	
*	name	varchar(500)	
*	experiment_id	bigint	
*	is_raw	bool	
*	is_layer	bool	
*	file_data	bytea	
*	create_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_experiment_files_id		
Foreign Keys			
	fk_experiment_files_users (create_by) ref users (id)		
	fk_experiment_files_experiment (experiment_id) ref experiment (id)		
*	epsilon	double precision	
*	mu	double precision	
	sigma	double precision	

Table experiment_data			
	layer_id	bigint	
*	create_at	timestamp	
*	update_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	update_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_experiment_data_id	id	
Foreign Keys			
	fk_experiment_data (experiment_file_id) ref experiment_files (id)		
	fk_experiment_data_users_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_experiment_data_users_upd (update_by) ref users (id)		
	fk_experiment_data_layer (layer_id) ref layer (id)		

Table experiment_raw_data			
---------------------------	--	--	--

* Pk	id	bigint	
*	experiment_file_id	bigint	
*	ord	integer	
*	point	integer	
*	value	double	
		precision	
*	create_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_experiment_ra	id	
w_id			
Foreign Keys			
	fk_experiment_raw_experiment (experiment_file_id) ref experiment_files (id)		
	fk_experiment_raw_data_users (create_by) ref users (id)		

Table kern			
* Pk	id	bigint	
*	road_id	bigint	
*	event_date	date	
*	sampling_location	text	
*	act_name	varchar(300)	
*	act_file	bytea	-
*Unq	reg_number	varchar(500)	
*	average_density	double	
		precision	
*	water_saturation	double	
		precision	
*	create_by	bigint	
*	create_at	timestamp	
*	update_by	bigint	
*	update_at	timestamp	
Indexes			
Pk	pk_kern_id	id	
Unq	idx_kern	reg_number	
Foreign Keys			
	fk_kern_road (road_id) ref road (id)		
	fk_kern_users_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_kern_users_upd (update_by) ref users (id)		

Table layer			
Pk	id	bigint	
*	name	varchar(1000)	
*	epsilon	double precision	
*	mu	double precision	
*	sigma	double precision	
	desc	text	
*	create_at	timestamp	
*	update_at	timestamp	
*	create_by	bigint	
*	update_by	bigint	
*	deleted	bool	
Indexes			
Pk	pk_layer_id	id	
Foreign Keys			
	fk_layer_users_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_layer_users (update_by) ref users (id)		

Table road			
* Pk	id	bigint	
*	index	varchar(200)	
*	name	varchar(100)	
*	desc	text	
*	road_type_id	bigint	
*	length	double precision	
*	create_by	bigint	
*	create_at	timestamp	

Table road			
*	update_by	bigint	
*	update_at	timestamp	
*	deteted	bool	
Indexes			
Pk	pk_road_id	id	
Foreign Keys			
	fk_road_road_type (road_type_id) ref road_type (id)		
	fk_road_users_crt (create_by) ref users (id)		
	fk_road_users_upd (update_by) ref users (id)		

Table users				
* Pk				
	fk_road_users_upd (update_by) ref users (id)			
id bigint *	fk_road_road_type (road_type_id) ref road_type (id)			
	name	varchar(200)		
	firstname	varchar(200)		
	middlename	varchar(200)		
	usertype	varchar(50)	ADMIN EXPERT VIEWER	
	data	json		
*	create_at	timestamp		
*	create_by	bigint		
*	deleted	bool		
Table road_type				
* Pk	id	bigint		
*	name	varchar(400)		
*	desc	text		
*	create_by	bigint		
*	create_at	timestamp		
*	update_by	bigint		
*	update_at	timestamp		
*	deleted	bool		
		Indexes		
Pk	pk_road_type_id	id		
Foreign Keys				
	fk_road_type_users_crt (create_by) ref users (id)			
	fk_road_type_users_upd (update_by) ref users (id)			
Indexes				
Pk	pk_users_id	id		
Foreign Keys				
	fk_users_createby (create_by) ref users (id)			

ISBN 978-601-391-014-7



К.Т. Искаков, А.Т. Кусаинова, Д. М. Бешсеев,
М.К. Турарова, А.М. Жансеитова

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ:
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ДИАГНОСТИКЕ

Типография не несет ответственности за содержание
Сдана в печать 12.12.2025 г. Тираж 20 экз. Формат 60x84_{1/16}
Объем усл. 8,7 п.л. Бумага офсетная Шрифт «Times New Roman»
Заказ по договору №132-нп от 01.12.2025

Отпечатано в типографии ИП «Булатов А.Ж.»
г.Астана , ул. Керей, Жанибек хандар, 22.