

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РУКОВОДСТВО
ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ**

Нур-Султан, 2020

УДК 519.6(035.3)

ББК 22.1

М 34

Рекомендована к изданию Ученым Советом Евразийского национального университета им.Л.Н.Гумилева, протокол №6 от «27» октября 2020 года

Рецензенты: д.ф.-м.н., профессор А.Л. Карчевский,

д.т.н., профессор А.А. Адамов,

д.т.н., профессор Т.Л. Тен.

Математическое обеспечение и руководство по интерпретации георадарных данных: монография / К.Т. Искаков, Д.К. Токсент, С.А. Боранбаев, С.К. Атанов, Ж.О. Оралбекова, А. Нуржанова. – Нур-Султан: ЕНУ, 2020. – с.

ISBN 978-601-337-419-2

В данном научном издании рассматриваются вопросы математического и программного обеспечения для решения ряда задач по интерпретации радарограмм.

Основная задача интерпретации радарограмм состоит в определении геоэфизического разреза среды, по наблюденным данным в точках измерений. В связи с этим нами рассмотрены численные алгоритмы определения геоэлектрического разреза (диэлектрической проницаемости, проводимости): метода подбора, оптимизационных методов и известных инженерно-технических приемов основанных на использовании экспериментально установленных соотношений. Приведены алгоритмы решения прямых задач электродинамики для набора моделей геологического разреза в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Приведена методика моделирования табличного представления источника, излучаемым георадаром, на основе георадарных исследований в однородной среде.

Рассмотрена математическая модель определению вида источника и физических характеристик неоднородного включения, зависящего от пространственной переменной. Алгоритмы восстановления были апробированы на реальных данных, полученных с помощью георадара «Зонд-12». Численный алгоритм позволяет определить вторичный источник, возбуждаемый неоднородным включением и, впоследствии, определить диэлектрическую проницаемость этого включения. Отклик среды, полученный от георадара, был очищен от шума и помех при помощи алгоритмов фильтрации и вейвлетов. Табличное представление отклика среды использовалось как дополнительная информация для решения обратной задачи по определению геофизических свойств локализованного объекта.

Полученные результаты демонстрируют как адекватность математической модели, так и возможность практического применения рассматриваемого метода для интерпретации радарограмм. Последняя глава настоящего издания носит учебно-методический характер. В ней отражены способы представления реальных данных в табличной форме, в дальнейшем предназначенный для обработки от шумов и помех.

Приведены физические основы систем георадиолокации. Изложены методика проведения расчетов: описания источника возмущения; определения глубины залегания; определения диэлектрической проницаемости и проводимости.

Книга предназначена для специалистов, использующих неразрушающие методы исследования геофизических задач, с использованием георадаров, а также для докторантов, соискателей, магистрантов и студентов старших курсов технических вузов.

УДК 519.6(035.3)

ББК 22.1

М 34

ISBN 978-601-337-419-2

©Искаков К.Т. и другие, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ	11
1.1 Алгоритм численного метода решения задачи электродинамики в слоистой среде	11
1.2 Алгоритм численного метода решения задачи электродинамики в вертикально неоднородной среде	18
1.3 Анализ чувствительности алгоритмов решение прямой задачи от входных данных.....	24
Список использованных источников к Ведение и Разделу 1:	27
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА И ОТКЛИКА.....	29
2.1 Математическая модель по восстановлению источника.	29
2.2 Математическое моделирование отклика среды	35
2.3. Экспериментальные исследования для определения источника .	38
2.4. Экспериментальные исследования для определения отклика	43
Список использованных источников к Разделу 2:	46
3. АЛГОРИТМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ.....	50
3.1 Алгоритмы обработки сигналов для георадиолокационных систем на основе Фурье-преобразований	51
3.2 Обработка радарограммы цифровыми фильтрами Баттерворт...	57
3.3 Обработка радарограммы вейвлет преобразованиями.	63
Список использованных источников к Разделу 3:	68
4 АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ЗАДАЧ.....	69
4.1 Алгоритмы по определению геоэлектрического разреза слоистых сред.....	70

4.2 Алгоритм определения геофизических данных локальных объектов	79
4.2.1 Метод решения обратной задачи георадиолокации.....	80
4.2.2 Численные результаты	83
4.2.3 Результаты экспериментальных исследований	86
4.3 Математическая модель и алгоритмы обработки георадарных данных.....	94
4.3.1 Алгоритм восстановления источника.....	95
4.3.2 Аналитический метод определения импульсной характеристики	99
4.3.3 Экспериментальные исследования. Интерпретация радарограмм.	100
4.3.4 Математическое моделирование. Численные расчеты.	104
Список использованных источников к Разделу 4:	110
5. РУКОВОДСТВО ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАДАРОГРАММ	118
5.1 Основы метода георадиолокации.....	118
5.2 Инженерно-технические приемы интерпретации радарограмм	125
5.2.1 Физические основы интерпретации радарограмм.....	125
5.2.2 Интерактивные способы определения геоэлектрического разреза	130
5.3 Математические моделирования интерпретации радарограмм ..	135
5.3.1 Алгоритмы первичной обработки георадарных данных	137
5.3.2 Метод подбора для определения геоэлектрического разреза ..	138
5.4 Подготовка объектов для проведения экспериментальных исследований.....	139
Список использованных источников к Разделу 5:	141
Приложение А. Экспериментальные измерения георадаром Лоза-В	144

Приложение Б. Экспериментальные исследования определения магнитной восприимчивости.....	150
Приложение В. Экспериментальные измерения георадаром Зонд-12	172
Приложение Г. Характеристики и интерфейс базы данных сигнала по данным георадара	186
Приложение Д. Математическая модель обработки сигналов.....	193
Приложение Е. Фототчет экспедиций	217

ВВЕДЕНИЕ

В первом разделе рассматривается численные методы решения прямых задач электродинамики в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Исходная задача электродинамики, в случае специального выбора источника электромагнитного возмущения, сведена к серии одномерных задач для уравнения геоэлектрики [1]. Оберазмерены входящие в уравнения геоэлектрики физические величины. В разделе приводятся алгоритмы для построения класса возможных вычисленных физических полей, для набора моделей геологического разреза в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Вертикально-неоднородные среды, рассмотрены нами как случаи наклонных сред, а также комбинации наклонных и слоистых сред, т.е рассматриваются непрерывные (сглаженные среды). Для такого случая, нет разрывов коэффициентов физических характеристик сред, которые в случае разрывов, приводят к определенным трудностям при построении алгоритма решения прямой и тем более алгоритмов решения обратных задач, в последнем случае при построении градиента функционала невязки. На основе метода «подбора» фиксированные точки измерения для класса вычисленных физических полей определяет класс функций, описывающих отклик среды [2]. Из условия минимума квадратичного отклонения наблюдаемого поля (георадарные данные в фиксированной точке) и вычисленного физического поля, в силу теоремы единственности [3] получаем искомую структуру среды, соответствующую данным георадара.

Во втором разделе приведена методика моделирования источника, излучаемым источником георадара. С этой целью проведены экспериментальные исследования с помощью георадара «Лоза-В». Выбран участок песчаного карьера, однородной среды – речной песок, с известными геофизическими свойствами. Определены спектральные характеристики сигналов излучаемых приемной антенной, с разверткой: 0,5 м, 1 м, 1,5 м., 3 метра, на основе дискретных преобразований Фурье. Проведена интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по моделированию источника, излучаемых прибором «Лоза-В».

Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде,

которая описывается системой уравнений Максвелла [1]. Различают постановки прямой и обратной задачи. Суть постановки прямой задачи, состоит в определении вектора напряженности электрического поля, по заданным геофизическим свойствам среды: диэлектрической и магнитной проницаемости; проводимости, а также источника возмущения. Постановка обратной задачи состоит, в определении геоэлектрического разреза, а именно физического состояния среды, по дополнительной информации. В качестве этой информации в задачах электромагнитной геофизики принимают отклик среды, а именно горизонтальную компоненту вектора электрической напряженности в точке наблюдения [1]. В связи с этим в начале, изучим постановку прямой задачи, на экспериментальном уровне, с применением георадиолокационного прибора, который и фиксирует отклик среды.

В третьем разделе приведены алгоритмы первичной обработки георадарных данных. Электромагнитные импульсы, возникающие в результате возбуждения передающей антенны генератором наносекундных импульсов, распространяются в зондируемой среде. Приемная антenna принимает данные сигналы, преобразует электромагнитный отклик в электрический сигнал. Полученный сигнал оцифровывается и передается в блок цифровой обработки (возможно компьютер), где проводится первичная обработка сигнала, запись во встроенную память для последующей обработки и визуализации.

Генераторная часть прибора обеспечивает возбуждение зондирующих импульсов в генераторной антенне на различных частотах.

Измерительная часть прибора обеспечивает регистрацию отраженных волн с приемной антенны, автоматическую временную регулировку усиления, стробирование и оцифровку сигнала.

Приведены классические алгоритмы обработки сигналов для георадиолокационных систем на основе Фурье-преобразований. Семейство преобразований Фурье включает в себя: преобразование Фурье; ряды Фурье; дискретные ряды Фурье; дискретное преобразование Фурье; Быстрое преобразование Фурье.

Рассматриваются методы снижения уровня шума при обработке реальных данных георадара. Приведены обработки радарограмм цифровыми фильтрами Баттервортса и в целом процедура выполнения цифровой фильтрации на реальных данных георадара серии «Лоза-В».

Для решения прикладных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, а исходная радарограмма выражает зависимость амплитуды сигнала от времени отражения. Затем необходимо избавиться от различных помех, скрывающих полезный сигнал.

С этой целью рассматриваются алгоритмы снижения уровня шума в радарограмме с использованием различных вейвлетов. Использовались: вейвлет Хаара и вейвлеты Добеши 4 - порядка. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени и неоднородных в пространстве. Результаты анализа должны содержать частотную характеристику сигнала распределение энергии сигнала по частотным составляющим. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов.

Приводится модуль реализации алгоритмов первичной обработки георадарных данных и алгоритм программного модуля по определению глубины залегания и диэлектрической проницаемости объектов полигона.

В результате исследования подповерхностной среды, получим множество сигналов, полученных от приемной антенны для каждого измерения георадаром. Множество таких трасс визуализируется методом переменной плотности в виде изображения. Разработан программный модуль определения глубины залегания объектов и относительной диэлектрической проницаемости подповерхностной среды. Местоположения подповерхностного объекта определяется вершиной гиперболы построенного по точкам максимальных значений амплитуд каждой трассы.

В первой части раздела предлагается алгоритм для интерпретации данных георадара по определению диэлектрической проницаемости и проводимости среды. С этой целью решены две практические обратные задачи. В начале определены параметры источника, генерируемого георадаром. По известному источнику, найдены относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость среды. Задачи решаются на известных средах, которые специально были подготовлены на полигоне. Для первой задачи создана однородная среда, для второй локальная неоднородность, расположенная в горизонтально-слоистой однородной среде. Во второй части данного раздела описан программный модуль

определения глубины залегания и проводимости подповерхностных объектов. Для определения глубины залегания подповерхностных объектов разработан программный модуль на языке С++. В программе в интерактивном режиме подбирается вид и размеры гиперболы и рассчитывается глубина залегания объекта, и проводимость сред.

В данном подразделе рассмотрены обратные задачи по определению вида источника и физических характеристик неоднородного включения, зависящего от пространственной переменной. Алгоритмы восстановления были апробированы на реальных данных, полученных с помощью георадара «Зонд-12».

Экспериментальные исследования проведены на полигоне с геологическим разрезом, содержащем идеально чистый песок и неоднородное включение «соляный купол» искусственного происхождения. Численный алгоритм позволяет определить вторичный источник, возбуждаемый неоднородным включением и, впоследствии, определить диэлектрическую проницаемость этого включения. Отклик среды, полученный от георадара, был очищен от шума и помех при помощи алгоритмов фильтрации и вейвлетов. Табличное представление отклика среды использовалось как дополнительная информация для решения обратной задачи по определению геофизических свойств локализованного объекта.

Полученные результаты демонстрируют как адекватность математической модели, так и возможность практического применения рассматриваемого метода для интерпретации радарограмм.

В данном подразделе рассмотрены обратные задачи по определению вида источника и физических характеристик неоднородного включения, зависящего от пространственной переменной. Алгоритмы восстановления были апробированы на реальных данных, полученных с помощью георадара «Зонд-12».

Экспериментальные исследования проведены на полигоне с геологическим разрезом, содержащем идеально чистый песок и неоднородное включение «соляный купол» искусственного происхождения. Численный алгоритм позволяет определить вторичный источник, возбуждаемый неоднородным включением и, впоследствии, определить диэлектрическую проницаемость этого включения. Отклик среды, полученный от георадара, был очищен от шума и помех при помощи алгоритмов фильтрации и вейвлетов. Табличное представление отклика среды использовалось как

дополнительная информация для решения обратной задачи по определению геофизических свойств локализованного объекта.

Полученные результаты демонстрируют как адекватность математической модели, так и возможность практического применения рассматриваемого метода для интерпретации радарограмм.

1. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

В данном разделе рассматриваются численные методы решения прямых задач электродинамики в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Исходная задача электродинамики, в случае специального выбора источника электромагнитного возмущения, сведена к серии одномерных задач для уравнения геоэлектрики [1]. Обе безразмерены входящие в уравнения геоэлектрики физические величины. В разделе приводятся алгоритмы для построения класса возможных вычисленных физических полей, для набора моделей геологического разреза в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Вертикально-неоднородные среды, рассмотрены нами как случаи наклонных сред, а также комбинации наклонных и слоистых сред, т.е рассматриваются непрерывные (сглаженные среды). Для такого случая, нет разрывов коэффициентов физических характеристик сред, которые в случае разрывов, приводят к определенным трудностям при построении алгоритма решения прямой и тем более алгоритмов решения обратных задач, в последнем случае при построении градиента функционала невязки. На основе метода «подбора» фиксированные точки измерения для класса вычисленных физических полей определяет класс функций, описывающих отклик среды [2]. Из условия минимума квадратичного отклонения наблюдаемого поля (георадарные данные в фиксированной точке) и вычисленного физического поля, в силу теоремы единственности [3] получаем искомую структуру среды, соответствующую данным георадара.

1.1 Алгоритм численного метода решения задачи электродинамики в слоистой среде

Метод «подбора» является распространенным в вычислительной практике способом приближенного решения уравнения вида:

$$Az = u, \quad \forall u \in U, \quad z \in F, \quad \text{где } U, F - \text{метрические пространства.}$$

При использовании данного метода, задаваясь достаточно широким классом возможных сред, вычисляют соответствующие им вычисленные физические поля и выбирают в качестве решения задачи какую-либо возможную структуру среды, для которой вычисленное физическое поле мало отличается от наблюдаемого поля. Для

элемента z некоторого заранее заданного подкласса возможных решений $M (M \subset F)$ вычисляется оператор Az , т.е. решается прямая задача. В качестве приближенного решения берется такой элемент z_0 из множества M , на котором невязка $\rho_u(Az_0, u) = \inf_{z \in M} \rho_u(Az, u)$, достигает минимума [2].

В нашем случае метод «подбора» осуществим следующим образом: пусть $M^{(1)}(\varepsilon_n, \sigma_n, \hbar_n^{(s)}), M^{(2)}(\varepsilon_n^{(s)}, \sigma_n, \hbar_n), M^{(3)}(\varepsilon_n, \sigma_n^{(s)}, \hbar_n)$ – классы возможных структур сред (геоэлектрический разрез), где $\hbar^{(s)} = \hbar^{(s-1)} + \delta\hbar^{(s)}$, $\sigma^{(s)} = \sigma^{(s-1)} + \delta\sigma^{(s)}$, $s = 0, 1, 2, \dots$ – параметр вариации, \hbar – ширина слоев модели. Как отмечено выше решаем серию прямых задач $Az_j = u_j, j = \overline{1, n}$. Откуда нетрудно определить класс откликов сред, в фиксированной точке наблюдения, т.е. $z_j(x, t) = g^j(t)$. Пусть показания прибора (георадара), в точке наблюдения известно, т.е. $f^j(t)$. Согласно метода «подбора» вычисляем невязку $\rho_u^j(Az_j^*, u) = \inf_{z_j \in M} \rho_u(Az_j, u)$. Элемента доставляющий минимум невязки является откликом среды, откуда определяется среда из класса сред M^j , тем самым будет решена задача интерпретации данных георадара.

Была создана совокупность данных решения алгоритма для построения класса возможных вычисленных физических полей, для набора моделей геологического разреза в случае слоистых сред. Приведем способы формирования класса возможных структур сред, см. Рис.1.1-1.3.

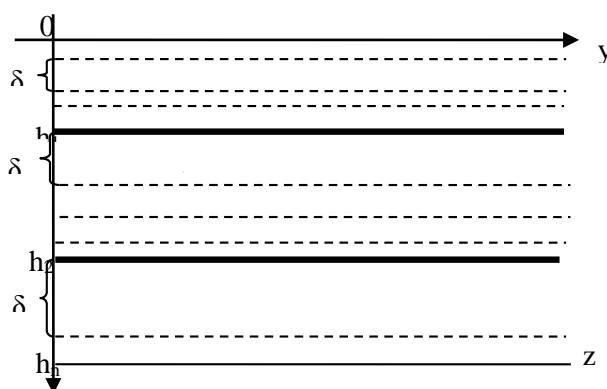


Рисунок 1.1 - Вариации по глубине мощности слоев

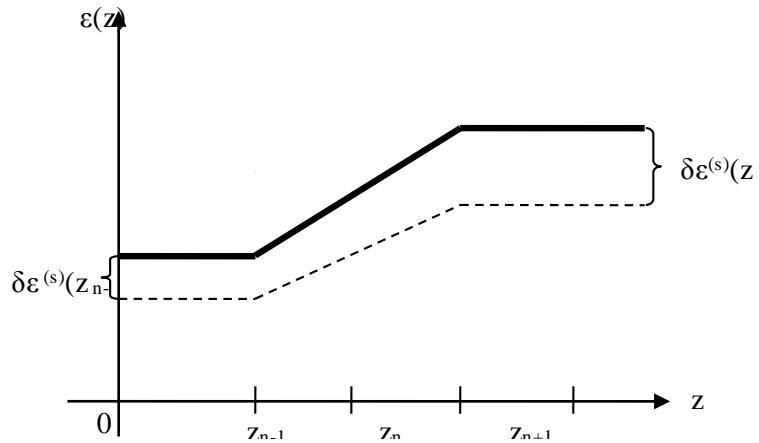


Рисунок 1.2 – Вариации по параметру-диэлектрической проницаемости

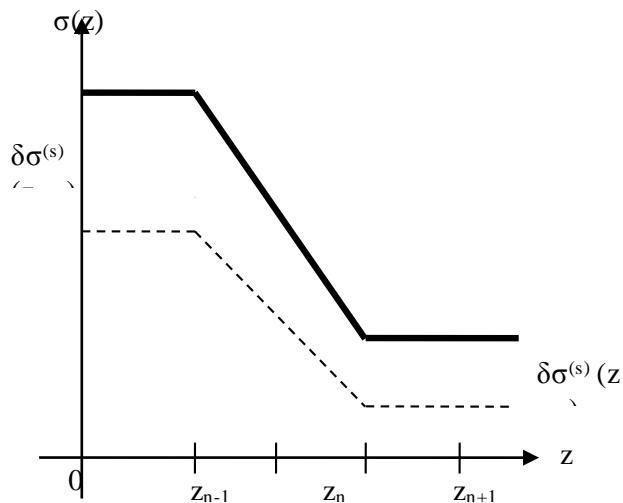


Рисунок 1.3 - Вариации по параметру-проводимости среды

При помощи варьирования основных характеристик сред (диэлектрическая проницаемость, проводимость сред, мощности слоев) был создан достаточно широкий класс возможных сред. Далее были решены серии прямых задач для каждого класса возможных структур сред.

Для ясности рассуждений приведем постановку прямой задачи электродинамики, которая состоит в следующем: на дневной поверхности включается источник стороннего тока j^{cm} , имеющий по времени колоколо-образный вид $r(t)$. В течении порядка 30-50 наносекунд измеряется отклик среды, представляющий с собой решение прямой задачи в точке наблюдения (измерения).

Полагаем, что коэффициент диэлектрической проницаемости ε , проводимость σ зависят от глубины x_3 . Выберем в качестве источника стороннего тока достаточно длинный кабель, расположенный по центру и протянутый вдоль по оси x_2 .

При таких предположениях система уравнений Максвелла сводиться к системе одномерных задач в построенном класса и удовлетворяют следующим уравнениям:

$$\varepsilon^{(s)} V^{(k)}_{tt} + \sigma V^{(k)}_t = \frac{1}{\mu} (V^{(k)}_{x_3 x_3} - \lambda^2 V^{(k)}) - P_\lambda q(x_3) r'(t), \quad (1.1)$$

$$V^{(k)}_{|t=0} = 0, \quad V^{(k)}_{t|t=0} = 0. \quad (1.2)$$

здесь: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{omn}$ – диэлектрическая проницаемость, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_{omn}$ – магнитная проницаемость, σ – проводимость сред, $p(x_1)$, $q(x_3)$ - функции, описывающие поперечные размеры источника, s – параметр вариации, $V^{(k)}$ - решения соответствующие классам $M^{(k)}(\varepsilon_n^{(s)}, \sigma_n, \hbar_n), k = 1, 2, 3, m, e$.

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

$$\vartheta = p_\lambda q(x_3) r'(t), \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_{omn}, \quad \mu = \mu_0 \mu_{omn}, \quad \varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{M}, \quad \mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{M}.$$

Рассмотрим случай слоистой среды, с известными границами раздела сред. В этом случае добавим к системе (1.1)-(1.2), условия непрерывности для горизонтальной компоненты E_2 , на границах раздела сред x_3^m :

$$[V^{(k)}]_{x_3=x_3^m} = 0, \quad [V^{(k)}]_{x_3=x_3^m} = 0, \quad m \text{ - номер узлов разрыва} \quad (1.3)$$

Постановка прямой задачи: По известным значениям кусочно-постоянных функций $\varepsilon^{(s)}(x_3)$, $\sigma^{(s)}(x_3)$, и положительной постоянной μ определить функцию $V^{(k)}$ как решение обобщенной задачи Коши из соотношений (1.1)-(1.3). При использовании класса $M^{(3)}(\varepsilon_n, \sigma_n^{(s)}, \hbar_n)$ рассматриваем систему одномерных задач:

$$\varepsilon V^{(3)}_{tt} + \sigma^{(s)} V^{(3)}_t = \frac{1}{\mu} (V^{(3)}_{x_3 x_3} - \lambda^2 V^{(3)}) - P_\lambda q(x_3) r'(t),$$

И соответственно, при использовании класса $M^{(1)}(\varepsilon_n, \sigma_n, \hbar_n^{(s)})$ рассматриваем следующие уравнения:

$$\varepsilon V^{(1)}_{tt} + \sigma V^{(1)}_t = \frac{1}{\mu} (V^{(1)}_{x_3 x_3} - \lambda^2 V^{(1)}) - P_\lambda q(x_3) r'(t),$$

Здесь проводим вариацию по мощности слоев сред и $\hbar^{(s)} = \hbar^{(s-1)} + \delta \hbar^{(s)}$.

Приведем численный алгоритм решения прямой задачи, построенной согласно общей теории разностных схем [4].

Введем замену переменных $\tau = \beta t$, β - коэффициент обезразмеривания. Положим, что $\beta = 10^8$, тогда задача (1.1)-(1.2) (см. раздел 1) в новых переменных (τ, x_3) , U , примет вид:

$$b^{(s)} U_{tt}^{(1)} + a^{(s)} U_{\tau}^{(1)} = U_{x_3 x_3}^{(1)} - \lambda^2 U^{(1)} - \gamma \bar{\vartheta}, \quad x_3 \neq x_3^k, \quad (1.4)$$

$$U^{(1)}|_{\tau=0} = 0, \quad U_{\tau}|_{\tau=0} = 0, \quad (1.5)$$

$$\left[U^{(1)} \right]_{x_3=x_3^k} = 0, \quad \left[U_{x_3}^{(1)} \right]_{x_3=x_3^k} = 0. \quad (1.6)$$

Где:

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

Определим размеры области вычислений по переменным x_3 , и τ . С этой целью вычислим время пробега прямой и отраженной волн в средах. Скорость волн по слоям вычисляем, так:

$$v^{(k)} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon_{omn}^k}}, \quad (k - \text{номер слоя}).$$

Разностная схема для уравнения (1.4), имеет вид :

$$b_i^{(s)} \frac{\hat{y}_i^{(1)} - 2y_i^{(1)} + y_i^{\vee(1)}}{\tau_0^2} + a_i^{(s)} \frac{\hat{y}_i^{(1)} - y_i^{\vee(1)}}{2\tau_0} = \frac{1}{i} \left(\frac{y_{i+1}^{(1)} - y_i^{(1)}}{h_{i+1}} - \frac{y_i^{(1)} - y_{i-1}^{(1)}}{h_i} \right) - \lambda^2 y_i^{(1)} - \gamma \vartheta, \quad \text{при } i \neq i^k,$$

и

$$i = -N_1, -N_1 + 1, \dots, 0, 1, \dots, N_1, \quad j = 3, 4, \dots, N_2 \quad (1.7)$$

Разностный аналог начальных условий (1.5):

$$y_i^{(1)} = 0, \quad y_i^{(2)} = 0, \quad i = -N_1, -N_1 + 1, \dots, 0, 1, \dots, N_1. \quad (1.8)$$

Для расчетов в конечной области, из условия (1.6) вытекает, что:

$$\hat{y}_{-N_1}^{(1)} = 0, \quad \hat{y}_{N_1}^{(1)} = 0, \quad j = 3, \dots, N_2, \quad (1.9)$$

Разрешив уравнение (1.7) относительно $\hat{y}_i^{(1)}$, имеем:

$$\hat{y}_i^{(1)} = \left[\left(r_2 y_{i+1}^{(1)} + r_1 y_{i-1}^{(1)} \right) + \left(2b_i^{(s)} - (r_2 + r_1 + \lambda^2) \right) y_i^{(1)} - \left(b^{(s)} - 0.5\tau_0 a_i^{(s)} \right) y_i^{\vee(1)} - \gamma \tau^2 \bar{\vartheta} \right] \Big/ \left(b^{(s)} + 0.5\tau_0 a_i^{(s)} \right) \\ i \neq i^k, \quad j = 3, 4, \dots, N_2. \quad (1.10)$$

Обозначено: $r_2 = \tau_0^2 / i^h i + 1$, $r_1 = \tau_0^2 / i^h i$ в узлах разрыва, т.е. при $i \neq i^k$. На основании условий сопряжений (1.6) имеем:

$$\hat{y}_{i^k}^{(1)} = \left(\frac{1}{h_{i^k+1}} \hat{y}_{i^k+1}^{(1)} + \frac{1}{h_{i^k}} \hat{y}_{i^k-1}^{(1)} \right) \Big/ \left(\frac{1}{h_{i^k+1}} + \frac{1}{h_{i^k}} \right), \quad j = 3, 4, \dots, N_2. \quad (1.11)$$

Аппроксимируем источник $\bar{\vartheta} = q(x_3) r'(\tau)$. Положим:

$$q(x_3) \equiv \begin{cases} \cos(\pi(x_3/l_0 + 1)) + 1, & x_3 \in [-l_0, 0] \\ 0, & x_3 \notin [-l_0, 0] \end{cases}$$

$$r(\tau) \cong \begin{cases} (\pi/2t_0)\sin(\pi\tau/t_0) & \tau \in [0, t_0] \\ 0, & \tau \notin [0, t_0] \end{cases} \quad (1.12)$$

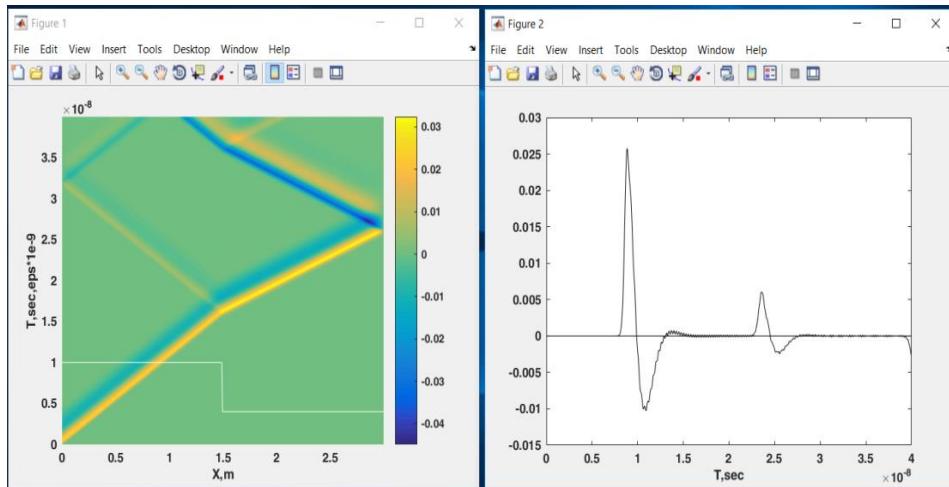
Значения t_0 определяются из условия задачи, т.е. если длительность источника 2нс, тогда для реальной модели $2t_0 = 2\text{нс}$, а в безразмерной форме составит 0,2 единиц. В нашем случае условия Куранта имеет вид:

$$\tau_0 < h_0/\bar{c}, \text{ где } h_0 = \min_{-N_1 < i < N_1} h_i, \bar{c} = \max_{-N_1 < i < N_1} b_i$$

Область по времени τ , аппроксимируем равномерной сеткой:

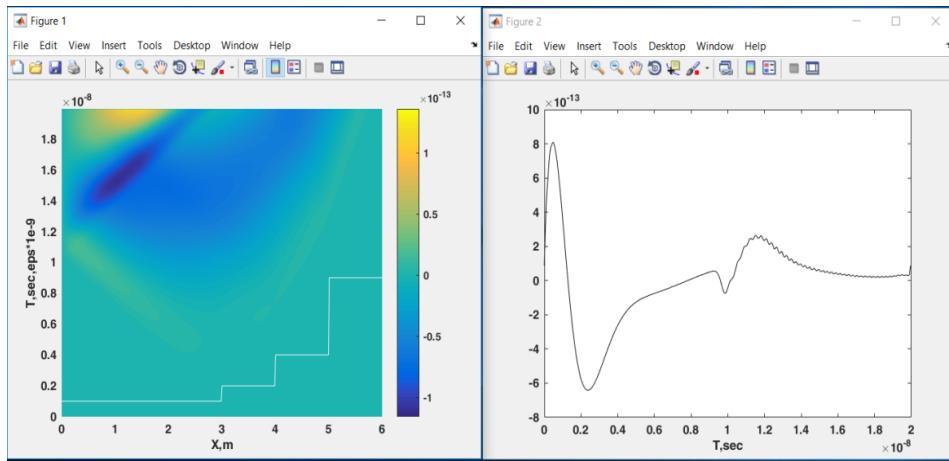
$\omega_\tau = \{\tau = (j-1)\tau_0, j=1,2,\dots,N_2\}$, где $N_2 = \tilde{T}/\tau_0 + 1$, \tilde{T} - время пробега прямой и отраженных волн. Область по переменной x_3 аппроксимируем неравномерной сеткой, чтобы узлы разрывов x_3^k совпадали с ее узлами $\tilde{\omega}_h = \{x_{3,i} = ih_i, i = -N_1, -N_1 + 1, \dots, 0, 1, \dots, N_1\}$.

Для демонстрации работы алгоритма (1.7)-(1.12) на рисунке 1.4 показано численное решение прямой задач для возможной структуры слоистой среды.



а) распространения сигнала б) отклик среды в слоистой среде
Рисунок 1.4 – Численное решение прямой задач для возможной структуры слоистой среды

На рисунке 1.5 показано решение прямой задачи для другой модели возможной структуры слоистой среды.



а) распространения сигнала б) отклик среды в слоистой среде
 Рисунок 1.5 - Решение прямой задачи для другой модели возможной структуры слоистой среды

Полученные показания георадара в фиксированной точке наблюдения с помощью метода «подбора», были сравнены с классом возможных структур, созданный более чем для 10000 вариантов. Тем самым была проведена интерпретация радарограмм. На рисунках 1.6 и 1.7 наглядно показана работа данного алгоритма. На рисунках 1.6 жирной черной линией показано решение прямой задачи для возможной структуры слоистой среды, тонкой черной линией полученные показания георадара в фиксированной точке наблюдения, полученная на 5002 итерации работы метода «подбора». Аналогичный результат, полученный на 6752 итерации, представлен на рисунке 1.7

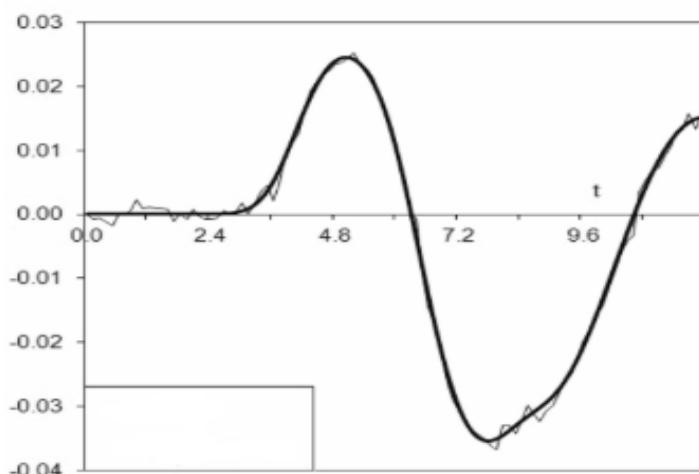


Рисунок 1.6 – Результат метода «подбора» для случая слоистых сред

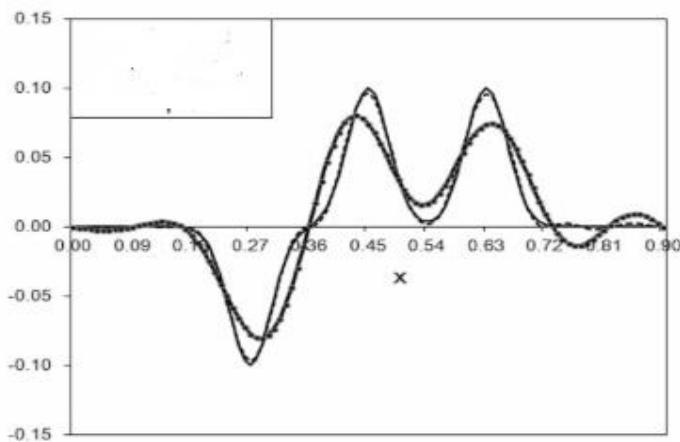


Рисунок 1.7 – Результат метода «подбора» для случая слоистых сред

Вывод: разработаны численные методы решения прямых задач электродинамики (слоистые среды). Разработаны алгоритмы и программа численных методов решения прямых задач электродинамики. Для сопоставления данных георадара с результатами расчетов модельных задач для уравнения геоэлектрики в случае слоистых сред использован метод «подбора». В классе конечно-параметрических сред построен алгоритм и программное обеспечению по определению класса вычисленных физических полей. Далее сопоставляя данные измерений с этим классом, восстанавливаем геологический разрез. Результаты исследований изложены на международной и республиканских конференциях в работах [5-7].

1.2 Алгоритм численного метода решения задачи электродинамики в вертикально неоднородной среде

В данном подразделе рассматривается конечно-разностный алгоритм решения прямой задачи в вертикально-неоднородной среде. Разработаны алгоритмы и программа решения прямых задач на разностном уровне для класса вертикально-неоднородных сред. Вертикально-неоднородные среды, рассмотрены нами как случаи наклонных сред, а также комбинации наклонных и слоистых сред, т.е рассматриваются непрерывные (сглаженные среды). Для такого случая, нет разрывов коэффициентов физических характеристик сред, которые в случае разрывов, приводят к определенным трудностям при построении алгоритма решения прямой и тем более алгоритмов решения обратных задач, в последнем случае при построении градиента функционала невязки.

Разработана программа на основе алгоритмов для построения класса возможных вычисленных физических полей для геологического разреза рассматриваемых нами моделей вертикально-неоднородных сред.

Приведем способ формирования класса вычисленных «физических полей» для вертикально неоднородных сред. Модель вертикально-неоднородной среды строим следующим образом:

Отрезок $[0, L]$, разобьем на N_z – частей, т.е. $\omega_z = \{z_i = ih, h = L/N_z, i = 0, 1, 2, \dots, n-1, n, n+1, \dots, N_z\}$

Пусть функция $\sigma(z)$, $\varepsilon(z)$ имеет структуру:

$$p(z) = \begin{cases} p_{n-1}, & z_n < z < z_{n-1}, \\ c_n z_n + d_n, & z = z_n, \\ p_{n+1}, & l \leq z \leq z_{n+1}. \end{cases} \quad (1.13)$$

$$c_n = \frac{q_{n+1} - q_{n-1}}{z_{n+1} - z_{n-1}}; \quad d_n = q_{n-1} - \frac{q_{n+1} - q_{n-1}}{z_{n+1} - z_{n-1}} * z_{n-1} \quad (1.14)$$

В точке z_n , мы гладко сшиваем функцию $p(z)$, от точки z_{n-1} с ординатой $q(z_{n-1})$ до точки $p(z_{n+1})$, с ординатой $p(z_{n+1})$ прямой $p(z) = c_n z + d_n$, $z_{n-1} \leq z \leq z_{n+1}$

Тем самым мы моделируем вертикально-неоднородные среды комбинацией слоистых и наклонных сред, как показано на рисунках 1.8-1.11.

Формирование класса возможных структур для вертикально неоднородных сред

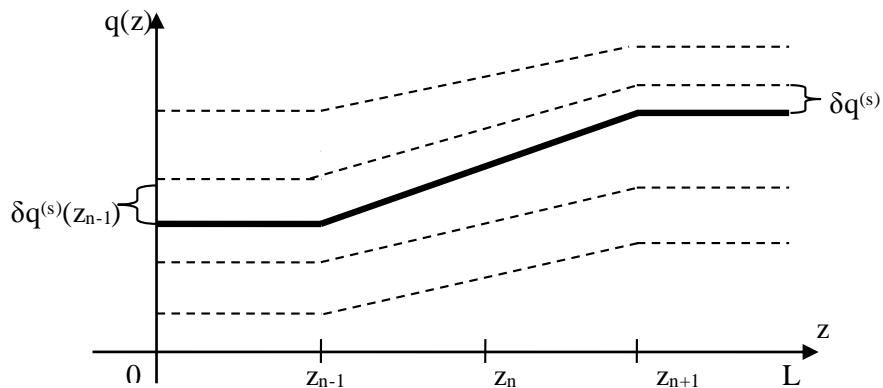


Рисунок 1.8 – Наклонная среда

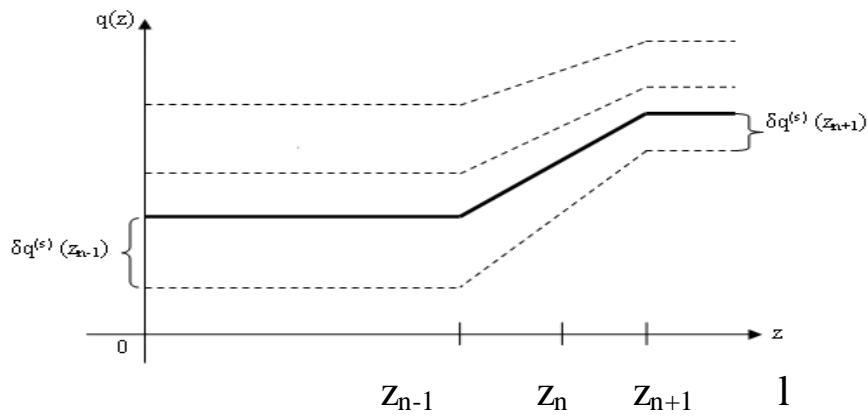


Рисунок 1.9 – Наклонная среда с преобладанием слоистой среды (влево)

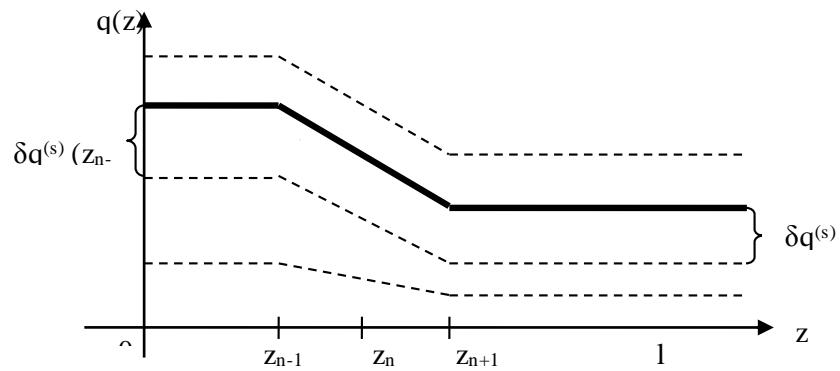


Рисунок 1.10 – Наклонная среда с преобладанием слоистой среды (вправо)

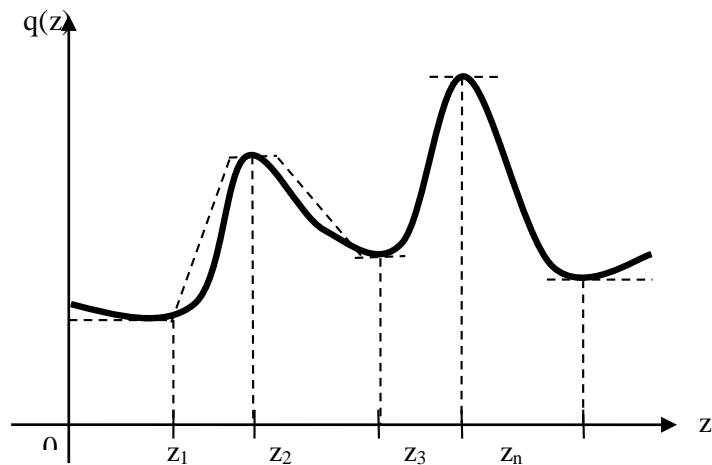


Рисунок 1.11 – Аппроксимация произвольной среды, сглаженной кусочно-слоистой среды

Сформируем классы $V^{(1)}(\varepsilon_i^{(s)}, \sigma_i)$, $V^{(2)}(\varepsilon_i, \sigma_i^{(s)})$, где $\varepsilon_i^{(s)} = \varepsilon_i^{(s-1)} + \delta \varepsilon_i^{(s)}$, варьируем коэффициенты $\varepsilon_i(z)$, сглаженные по формуле (1.13)-(1.14). Здесь $i = 0, 1, 2, \dots, n+1, \dots, N_z$ - узлы сетки, $s = 1, 2, \dots, M$ параметры варьирования.

Также отметим, что в этом классе коэффициент $\sigma_i(z)$, не варьируется, и вычисляется по формуле сглаживания (1.13)-(1.14).

Аналогично определим класс $V^{(2)}(\varepsilon_i, \sigma_i^{(s)})$, где $\sigma_i^{(s)} = \sigma_i^{(s-1)} + \delta\sigma_i^{(s)}$, варьируем коэффициент $\sigma(z)$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1, n, n+1, \dots, N_z$, $\delta\sigma(z)$ - шаг варьирования проводимости $\sigma(z)$.

Для построения конечно-разностного алгоритма, приведем постановку рассматриваемой задачи на дифференциальном уровне.

Рассмотрим систему одномерных задач для уравнения геоэлектрических [1], в рассматриваемых классах имеет вид:

$$u_{tt}^{(1)} + \frac{\sigma}{\varepsilon^{(s)}} u_t^{(1)} = \frac{1}{\mu\varepsilon^{(s)}} (u_{zz}^{(1)} - \lambda^2 u^{(1)}) - \frac{1}{\varepsilon^{(s)}} \tilde{q}_\lambda \delta(z, t), z < 0, \quad (1.15)$$

$$u^{(1)}|_{t=0} = 0, \quad u_t^{(1)}|_{t=0} = 0, \quad (1.16)$$

$$\left(\frac{1}{\mu} u_z^{(1)}(0, t) \right) \Big|_{z=+0} = f_{(2)}^{(1)}(t), \quad (1.17)$$

где, λ – параметр Фурье, $u^{(1)}(z, t) = F_{x1}[E^{(1)}(x, 0, z, t)]$, $\tilde{q}_\lambda = F_{x1}[q(x)]$,

Пусть относительно решения прямой задачи (1.15) – (1.17), известно дополнительная информация:

$$u^{(1)}(0, t) = f_{(1)}(t) \quad (1.18)$$

Для вычисления краевого условия (1.18) как указанно в [1], решаем прямую задачу:

$$u_{tt}^{(1)} = \frac{1}{\mu\varepsilon^{(3)}} (u_{zz}^{(1)} - \lambda^2 u^{(1)}) - \frac{1}{3} \tilde{q}_\lambda \delta(z, t) < 0, \quad z > 0 \quad (1.19)$$

$$u^{(1)}|_{t=0} = 0, \quad u_t^{(1)}|_{t<0} = 0,$$

приняв в качестве краевого условия дополнительную информацию (1.18). В уравнении (1.19), отсутствует второй член уравнения (1.15), так как $\sigma=0$ в воздухе.

Для проведения численных расчетов решения прямой задачи для уравнения (1.15) удобно перейти к новой переменной [1]:

$$x_3 = x_3(z) = \int_0^z \sqrt{\mu\varepsilon(\xi)} d\xi, \quad z = \omega(x_3),$$

к новым функциям: $a(x_3) = \frac{\sigma(\omega(x_3))}{\varepsilon(\omega(x_3))}$, $b(x_3) = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon(\omega(x_3))}}$,

$$w(x_3, t) = u(\omega(x_3), t), \gamma_0 = -q(\lambda) \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon(0)}}.$$

Тогда (1.15), (1.17) примет вид:

$$w_{tt}(x_3, t) = w_{x_3 x_3}(x_3, t) - Pw(x_3, t), \quad (1.20)$$

$$w|_{t<0} = 0, w|_{t>0} = 0. \quad (1.21)$$

Где: $Pw(x_3, t) = a(x_3)w_t(x_3, t) + \frac{b'(x_3)}{b(x_3)}w_{x_3}(x_3, t) + (\lambda b(x_3))^2 w(x_3, t)$.

$$a^{(s)}(x_3) = \frac{\sigma(\omega(x_3))}{\varepsilon^{(s)}(\omega(x_3))}, \quad b^{(s)}(x_3) = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon^{(s)}(\omega(x_3))}},$$

коэффициент для класса $V_1^{(k)}(\varepsilon_i^{(s)}, \sigma_i), k = 1, 2$

$$a^{(s)}(x_3) = \frac{\sigma^{(s)}(\omega(x_3))}{\varepsilon(\omega(x_3))}, \quad b^{(s)}(x_3) = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon^{(s)}(\omega(x_3))}};$$

коэффициент для класса $V_2^{(k)}(\varepsilon_i, \sigma_i^{(s)}), k = 1, 2..$

Замечание: переход к новым переменным и новым функциям позволил выпрямить характеристики гиперболического уравнения, см. уравнение (1.20), это позволит нам в случае гладких коэффициентов построить устойчивую разностную схему.

Для численного решения прямой задачи в построенном классе коэффициентов, используем явную схему для трёхслойной схемы общего вида, который подробно описан ниже.

Конечно-разностный алгоритм решения прямой задачи

Используем разностную схему второго порядка [4]:

$$\frac{y_i^{k+1} - 2y_i^k + y_i^{k-1}}{\tau^2} + a_i^{(s)} \frac{y_i^{k+1} - y_i^{k-1}}{2\tau} = \frac{y_{i+1}^k - 2y_i^k + y_{i-1}^k}{h^2} - \frac{1}{h} \frac{b_{i+1}^{(s)} - b_{i-1}^{(s)}}{b_{i+1}^{(s)} + b_{i-1}^{(s)}} \cdot \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{2h} - (\lambda b_i^{(s)})^2 \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{2} \quad (1.22)$$

$$y_i^1 = y_i^0, \quad i = 0, 1, \dots, N_x \quad (1.23)$$

$$y^k = y^{k-1} + \mu h f_2, \quad k = 1, 0, \dots, N_{t-1} \quad (1.24)$$

$$y_{N_x}^k = 0, \quad (1.25)$$

Запишем разностную схему относительно y_i^{k+1} , имеем:

$$y_i^{k+1} = \left[\beta_i^{(1)} y_{i+1}^k + \beta_i^{(2)} - \left(1 - \frac{h a_i^{(s)}}{2} \right) y_i^{k-1} \right] / \left(1 + \frac{h a_i^{(s)}}{2} \right)$$

где:

$$\beta_i^{(j)} = 1 + \frac{(-1)^j}{2} \frac{b_{i+1}^{(s)} - b_{i-1}^{(s)}}{b_{i+1}^{(s)} + b_{i-1}^{(s)}} - \frac{(h \lambda b_j^{(s)})^2}{2}, \quad j = 1, 2$$

$$q(x_3) \cong \begin{cases} \cos(\pi(z/l_0 + 1)) + 1, & x_3 \in [-l_0, 0] \\ 0, & x_3 \notin [-l_0, 0] \end{cases}$$

$$r(\tau) \cong \begin{cases} (\pi/2t_0) \sin(\pi\tau/t_0) & \tau \in [0, t_0] \\ 0, & \tau \notin [0, t_0] \end{cases}$$

Значения l_0 , t_0 определяются из условия задачи, т.е. если длительность источника 2нс, тогда для реальной модели $2t_0 = 2\text{нс}$, а в безразмерной форме составит 0,2 единиц. Условия Куранта имеет вид:

$$\tau_0 < h_0 / \bar{c}, \text{ где } h_0 = \min_{-N_1 < i < N_1} h_i, \bar{c} = \max_{-N_1 < i < N_1} b_i$$

Область по переменной τ , аппроксимируем равномерной сеткой: $\omega_\tau = \{\tau = (j-1)\tau_0, j = 1, 2, \dots, N_2\}$, где $N_2 = \tilde{T}/\tau_0 + 1$, \tilde{T} - общее время пробега прямой и отраженной волны.

$$\tilde{\omega}_h = \{z_i = ih_i, i = -N_1, -N_1 + 1, \dots, 0, 1, \dots, N_1\}.$$

Разработана программа на основе алгоритмов для построения класса возможных вычисленных физических полей для моделей вертикально-неоднородных сред. Для демонстрации полученных алгоритмов (1.22)-(1.25) проведены численные эксперименты: в качестве объекта исследования был выбран объект «Курган» научно-исследовательского полигона. На рисунке 1.12 представлен геоэлектрический разрез данного объекта.

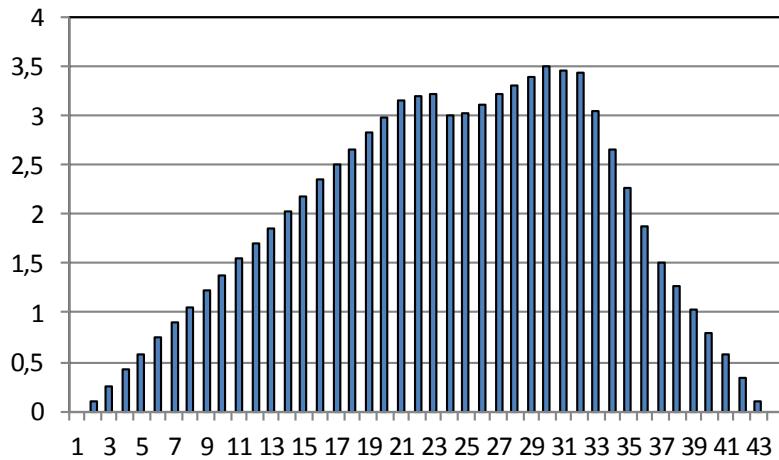


Рисунок 1.12 – Представлен геоэлектрический разрез объекта «Курган»

Далее полученные экспериментальные данные георадара в фиксированной точке наблюдения с помощью метода «подбора» были сравнены с классом возможных структур для вертикально-неоднородных сред (было сгенерировано более 11000 тыс. решений прямой задачи для вертикально-неоднородных сред). На рисунке 1.13 прерывистой линией (красный цвет) показаны модельные данные, экспериментальные данные показаны непрерывной линией (синий цвет). Данный результат был достигнут на 5485 итерации алгоритма метода «подбора».

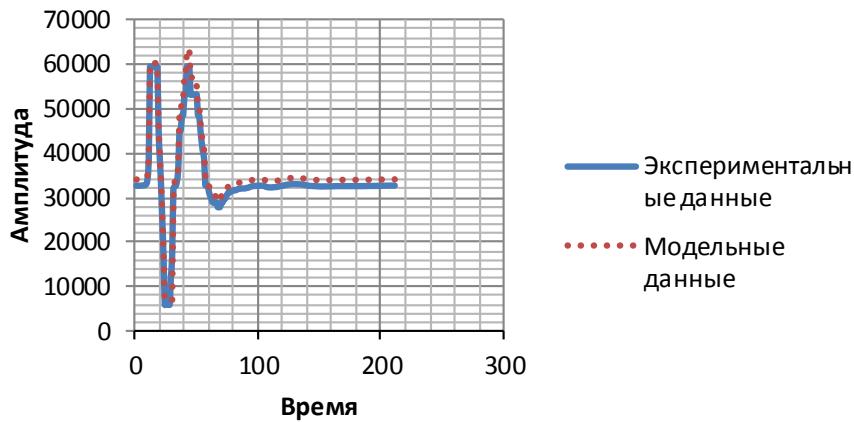


Рисунок 1.13 - Результат метода «подбора» для вертикально-неоднородных сред

Вывод: по аналогии как в первом подразделе, был разработан программный пакет для построения класса возможных структур: решая прямую задачу электродинамики в волновой постановке для определения класса физических полей. Фиксирование точки измерения для класса вычисленных физических полей определяет класс функций, описывающих отклик среды. Затем строится квадратичное отклонение наблюдаемого поля (георадарные данные в фиксированных точках) и класс отклика среды. В силу теоремы единственности получаем структуру среды, соответствующую данным георадара

Результаты по данному подразделу были опубликованы в работах [8-11].

1.3 Анализ чувствительности алгоритмов решения прямой задачи от входных данных

В данном подразделе проведен анализ чувствительности комплекса алгоритмов решения прямой задачи от изменения (варьирования) входных данных. Проведены серии расчетов для класса входных параметров, куда входят физические характеристики сред и толщина пластов. Для различного класса сред просчитаны величина квадратичного функционала невязки наблюдаемого и вычисленного физического полей. Определен критерий устойчивости алгоритма в зависимости пологости функционала невязки.

Для различного класса сред просчитаны величина квадратичного функционала невязки наблюдаемого и высчитанного физического полей. Это позволяет экспериментально определить те входные параметры, которые вносят вклад на устойчивость алгоритма решения обратных коэффициентных задач.

Как и ранее, построим класс возможных структур $V_i^{(m)}$, для варьирования входных данных следующим образом: $V_i^{(1)}(\varepsilon_i^k, \sigma_i, h, \lambda)$ это класс в котором варьируется первый параметр ε_i^k , то есть $\varepsilon_i^k = \varepsilon_i^{k-1} + \delta\varepsilon_i^k$, i - номера слоев $\delta\varepsilon_i^k$ - шаг варьирования по ε_i . Аналогично строим классы для варьирования по другим входным параметрам.

$V_i^{(2)}(\varepsilon_i, \sigma^k, h_i, \lambda)$, здесь варьируется параметр $\sigma_i^k = \sigma_i^{k-1} + \delta\sigma_i^k$, i - номер слоя $\delta\sigma_i^k$ - шаг варьирования по параметру σ_i .

где: $h_i^k = h_i^{k-1} + \delta h_i^k$,

Рассмотрим квадратичный функционал невязки:

$$J(\varepsilon) = \int_0^T [q(t) - f_1(t)] dt$$

Где: $g^m(t)$ – дополнительная информация просчитана для класса варьированных задач по входным данным, Т – время наблюдения, $m = 1, 2, \dots$, $f_{(1)}(t)$ - дополнительная информация, а именно:

$$v^{(1)}(0, t) = f_{(1)}(t), \quad (1.26)$$

для следующей задачи:

$$\varepsilon v_{tt}^{(1)} + \sigma v_t^{(1)} = \frac{1}{\mu} v_{x_3 x_3}^{(1)} - \frac{\lambda^2}{\mu} v^{(1)} - \tilde{g}_\lambda \delta(x_3) \delta(t), \quad x_3 > 0 \quad (1.27)$$

$$v^{(1)} \Big|_{t=0} = 0, \quad v_t^{(1)} \Big|_{t=0} = 0 \quad (1.28)$$

$$\frac{1}{\mu} v_{x_3}^{(1)} \Big|_{x_3=+0} = f_{(2)}(t) \quad (1.29)$$

$$v^{(1)} \Big|_{x_3=e} = 0 \quad (1.30)$$

Для определения краевого условия (1.29), принимая условие (1.26) как краевое условие, в области $\{x_3 < 0\}$ – воздух, где $\sigma = 0$. Из соотношений (1.27)-(1.30) мы имеем следующую задачу:

$$\varepsilon v_{tt}^{(1)} = \frac{1}{\mu} v_{x_3 x_3}^{(1)} - \frac{\lambda^2}{\mu} v^{(1)} + \tilde{g}_\lambda \delta(x_3) \delta(t), \quad x_3 < 0, \quad (1.31)$$

$$v^{(1)} \Big|_{t<0} = 0, \quad v_t^{(1)} \Big|_{t<0} = 0 \quad (1.32)$$

$$v^{(1)}(0, t) = f_{(1)}(t) \quad (1.33)$$

$$v^{(1)} \Big|_{x_3=e} = 0 \quad (1.34)$$

Таким образом, разрешив прямую задачу (1.31)–(1.34) в воздухе, мы можем определить и условие (1.29).

Для всех указанных классов, согласно приведенной выше постановки решения прямой задачи вычисляем дополнительную информацию $q^m(t)$, где $m=1,2,3$ – номера класса структур для варьирования.

Для моделей среды рассмотренных в подразделе 1 проведен следующий численный эксперимент: варьировались значения диэлектрической проницаемости и проводимости N -ого слоя в интервале от $[0; m]$ и вычислялись значения функционала невязки.

На рисунке 1.14 показано поведение функционала невязки при различных значениях λ от 0,3 до 10.

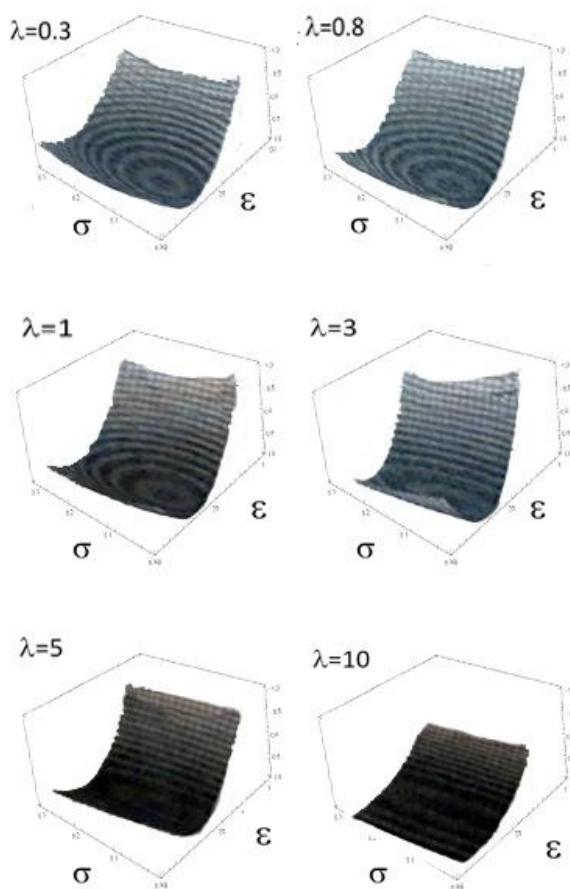


Рисунок 1.14 – Поведение функционала невязки при различных λ

Анализ на чувствительность алгоритма: из проведенных численных экспериментов было получено, что при увеличении λ теряется чувствительность функционала невязки к вариациям искомых параметров. На рисунке 1.14 наглядно видно, что при $\lambda \in [0.3, 1]$

с шагом 0.01, явно виден минимум функционала невязки и есть гарантия, о восстановлении геоэлектрического разреза. При увеличении параметра даже при диапазоне $\lambda \in [1,10]$ функционал становится пологим, и экстремум при данных входных параметрах не достигается [12].

Список использованных источников к Ведение и Разделу 1:

1. Романов В.Г., Кабанихин С.И., Обратные задачи геоэлектрики. /М.Наука. 1991 -304 с.
2. Тихонов А.Н., Арсений В.Я. Методы решения некорректных задач. //М.: Наука, 1979 - 285 с.
3. Романов В.Г. Обратные задачи математической физики. //М.: Наука, 1984 - 264 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. //М. Наука. 1977 г. - 656 с.
5. Атанов С.К. «Применение георадаров для решения задач электродинамики слоистых сред подповерхностных покрытий на территории Казахстана» //Конференция «ГЕОРАДАР-2018», 12-13 марта, Москва, 2018. http://georadarconf.ru/conf2018/agenda/Primenenie_georadarov_dlya_resheniya_zadach/
6. Токсент Д.К., Искаков К.Т. Алгоритм численного решения прямой задачи электродинамики //Сборник докладов «Труды V Международной научно-практической конференции «интеллектуальные информационные и коммуникационные технологии – средство осуществления третьей индустриальной революции в свете стратегии «Казахстан-2050»» - 22 февраля 2018 г. – В. Астана, 2018. – С. 236-239.
7. Есебаева Б.Е., Кусаинова А.Т., Применение информационных технологий для решения задач геофизики //Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург–Астана–Киев–Вена, «30» января 2018 года) /Международный научный центр, 2018. – С. 30-34.
8. Искаков К.Т., Кусаинова А.Т., Алгоритм численного решения прямой задачи для формирования класса «физических полей». //Международный казахско-турецкий университет Имени Ходжи

Ахмеда Ясави, Научная конференция математиков Казахстана, Актуальные проблемы математики, 2018. - С. 50 – 53

9. Турагрова М.К., Ұзаққызы Н., Нуржанова А.Б., Искаков К.Т. Алгоритм решения прямой задачи геоэлектрики в вертикально неоднородной среде //Сборник материалов XIII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование - 2018». – 12 апреля 2018 В. – В. Астана, 2018. - С. 953-988.

10. Есебаева Б.Е., Кусаинова А.Т., Применение информационных технологий для решения задач геофизики //Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург–Астана–Киев–Вена, «30» января 2018 года) //Международный научный центр, 2018. – С. 30-34.

11. Кусаинова А.Т., Есебаева Б.Е. Искаков К.Т. Создание информационной системы для обработки экспериментальных GPR данных //Международная конференция Global Science and Innovation, Eger, Hungry, 2018. – С. 74 – 77.

12. Искаков К.Т., Кусаинова А.Т. Алгоритм решения прямой задачи геоэлектрики в вертикально неоднородной среде //Международный казахско-турецкий университет Имени Ходжи Ахмеда Ясави, Научная конференция математиков Казахстана, Актуальные проблемы математики, 2018. - С. 90 – 93.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА И ОТКЛИКА

Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде, которая описывается системой уравнений Максвелла [1]. Различают постановки прямой и обратной задачи. Суть постановки прямой задачи, состоит в определении вектора напряженности электрического поля, по заданным геофизическим свойствам среды: диэлектрической и магнитной проницаемости; проводимости, а также источника возмущения. Постановка обратной задачи состоит, в определении геоэлектрического разреза, а именно физического состояния среды, по дополнительной информации. В качестве этой информации в задачах электромагнитной геофизики принимают отклик среды, а именно горизонтальную компоненту вектора электрической напряженности в точке наблюдения [1]. В связи с этим в начале, изучим постановку прямой задачи, на экспериментальном уровне, с применением георадиолокационного прибора, который и фиксирует отклик среды.

В первом подразделе приведена методика моделирования источника, излучаемым источником георадара. С этой целью проведены экспериментальные исследования с помощью георадара «Лоза-В». Выбран участок песчаного карьера, однородной среды – речной песок, с известными геофизическими свойствами. Определены спектральные характеристики сигналов излучаемых приемной антенной, с разверткой: 0,5 м, 1 м, 1,5 м., 3 метра, на основе дискретных преобразований Фурье. Проведена интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по моделированию источника, излучаемых прибором «Лоза-В».

2.1 Математическая модель по восстановлению источника.

В данном подразделе рассматривается математическая модель по восстановлению формы и табличного значения источника на основе реальных данных сигналов от приемника георадара серии Лоза-В. В качестве математической модели выбрано уравнение геоэлектрики в цилиндрической системе координат. Эксперименты, с использованием георадара, проведены на однородном участке чистый речной песок, с известными геоэлектрическими свойствами. В этом случае

рассматриваемое уравнение с помощью специальной замены функций сводится к дифференциальному уравнению Риккати. Это позволило получить явное выражение, связывающие спектр функции описывающие отклик среды (реальных данных радара) и спектр функции описывающий поведение источника. Найденный спектр источника, несет в себе ряд погрешностей технического и вычислительного характера, поэтому корректирован калибровочной функцией, построенной на основе теории квадратичного приближения функций. Далее с использованием обратных преобразований Фурье, восстановлен сам излучаемый источник в табличной форме. Проведены серии численных расчетов, показывающих эффективность рассматриваемой математической модели по восстановлению источника. На основе реальных данных георадара и калибровочной функции источника в частотной области, нами проведены численные расчеты решения обратной задачи по восстановлению геоэлектрического разреза сред. Использована методика расчетов послойного пересчета, разработанного и достаточно изученного в процитированных в списке литературы серии работ профессора А.Л. Карчевского.

Приборы подповерхностной радиолокации (георадары) в настоящее время используются для диагностики и выявления недоступных и скрытых подземных и других подповерхностных структур. В Дальнем и Ближнем зарубежье существуют различные модификации подобных приборов, которые нашли широкое коммерческое применение. Теоретические основы и практические методологии подповерхностной георадиолокации описаны в работах [1]-[10].

Как правило, георадары имеют встроенное программное обеспечение, выходная информация которого представляет собой радарограмму, т.е. временные развертки отраженного сигнала, снятые вдоль трассы. Результат интерпретации существенно зависит от опыта геофизика – интерпретатора и навыков чтения радарограмм, что вносит субъективные факторы в процесс обработки данных.

С другой стороны, существуют иное направление интерпретации радарограмм, а именно математическое и компьютерное моделирование процесса распространения и отражения электромагнитных волн в среде. Радарограмма несет информации времени пробега до неоднородности, а на практике возникает интерес определить физические характеристики неоднородности. В случае

отраженных электромагнитных сигналов к физическим характеристикам исследуемых объектов относятся: диэлектрическая и магнитная проницаемость, проводимость сред. Для определения этих коэффициентов широкое распространение получила теория некорректных и обратных задач, которое получило бурное развитие в 20-ом веке. Основа этой теории восходит от первых работ в этом направлении академика А.Н. Тихонова [11]. Теоретические основы и вопросы численного метода решения обратных задач для уравнения геоэлектрики подробно освещены в монографии В.Г. Романова, С.И. Кабанихина [1]. Применение оптимизационных методов для решения коэффициентных обратных задач изложены в монографии С.И. Кабанихина и Исакова К.Т. [12].

Для случая слоистых сред широкое распространение получил метод послойного пересчёта [13]. Известно, что дифференциальное уравнение или система дифференциальных уравнений второго порядка могут быть сведены с помощью специальной замены функций к дифференциальному уравнению Риккати или дифференциальному матричному уравнению Риккати. В геофизической практике, этот прием был использован в работе Дмитриева В.И. [14] для дифференциального уравнения второго порядка для решения прямой задачи электроразведки.

В работах Карчевского А.Л. [15-16] представлен алгоритм для решения системы дифференциальных уравнений теории упругости, а в работе [17] данная методика применена для уравнений Максвелла для горизонтально-слоистых сред любого вида анизотропии. В дальнейшем данная методика получила развитие в работе [18].

При георадарных исследованиях известны данные измерения полученных приемником являются откликом среды, полученные в точке измерения, как функции от времени пробега. В дальнейшем данные используются как дополнительная информация для решения обратных коэффициентных задач. Для решения обратной задачи используем методы оптимизации, суть которой состоит в минимизации квадратичного функционала невязки рассчитанных и наблюдаемых полей (данные приемной антенны прибора).

В связи с этим для решения прямой задачи, необходимо определить табличное значение источника сигнала. С этой целью проведены экспериментальные исследования на однородном участке (речной песок), с известным геоэлектрическим разрезом. Полученный сигнал от приемника использована нами как дополнительная

информация для решения обратной задачи по восстановлению формы источника. Рассматривается уравнение геоэлектрики, в цилиндрической системе координат, в частотной области. Рассматриваемое уравнение сведены с помощью специальной замены функций к дифференциальному уравнению Риккати.

Проведены экспериментальные исследования на лабораторном полигоне с использованием прибора. Реальные данные использованы для численного расчета по определению формы и табличного значения излучаемого сигнала. В работе используются также методика по восстановлению сигналов по спектру, на основе применения Фурье преобразований приведенные в работе [19]. На основе реальных данных георадара и калибровочной функции источника в частотной области, нами проведены численные расчеты решения обратной задачи по восстановлению геоэлектрического разреза сред.

Описание математической модели по восстановлению источника.

Рассмотрим уравнение геоэлектрики в цилиндрической системе координат:

$$\varepsilon u_{tt} + \sigma u_t = \frac{1}{\mu} (u_{rr} + \frac{1}{r} u_r + u_{zz}) + \frac{1}{r} \delta(r) \delta(z - z_*) g(t) \quad (2.1)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} u(0, x, y, z) &= 0, \\ u_t(0, x, y, z) &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Пусть

$$\mathcal{G}(v, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} \int_0^{\infty} u(r, z, t) r J_0(vr) dr dt, \quad (2.3)$$

Тогда, после несложных вычислений, с использованием (2.3), задача (2.1)-(2.2) примет вид:

$$\mathcal{G}_{zz} - k^2(z) \mathcal{G} = 0, \quad (2.4)$$

$$[\mathcal{G}_z]_0 = 0, \quad [\mathcal{G}]_0 = 0, \quad (2.5)$$

$$[\mathcal{G}_z]_{z_*} = \hat{g}(\omega), \quad [\mathcal{G}]_{z_*} = 0. \quad (2.6)$$

Используя стандартные приемы, как в работах [26]-[27], перейдем к уравнению Риккати:

$$\mathcal{G}_z = s \mathcal{G} \Rightarrow s' + s^2 = k^2, \quad z \in (-\infty, z_*], \quad z \in [0, \infty)$$

$$s(z) = k_0$$

$$s(z) = -k_1 = s^0.$$

Вычислим:

$$s^* = k_0 \frac{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z_*} + (s^0 - k_0)}{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z_*} - (s^0 - k_0)},$$

$$\mathcal{G}\Big|_{z=z_*+0} s^* - \mathcal{G}\Big|_{z=z_*-0} k_0 = \hat{g}(\omega),$$

$$\mathcal{G}\Big|_{z=z_*+0} - \mathcal{G}\Big|_{z=z_*-0} = 0,$$

$$\mathcal{G}^* = \frac{\hat{g}(\omega)}{s^* - k_0},$$

$$\mathcal{G}(0) = \frac{2k_0 e^{k_0 z_*}}{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z_*} - (s^0 - k_0)} \cdot \frac{\hat{g}(\omega)}{s^* - k_0}.$$

Устремим

$$z_* \rightarrow 0 \Rightarrow s^* = s^0 = -k_1,$$

$$\mathcal{G}(\nu, 0, \omega) = -\frac{\hat{g}(\omega)}{k_1 + k_0}$$

и учитывая (2.3), окончательно получим:

$$\mathcal{G}(r_0, 0, \omega) = -\hat{g}(\omega) \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{\sqrt{\nu^2 - (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i\omega \mu_0 \sigma_1) + \sqrt{\nu^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0}}} d\nu. \quad (2.7)$$

Схема решения по восстановлению источника

1⁰. Пусть известны данные георадара - отклик среды в однородной среде:

1⁰. Установим, что реальные данные радара в точке измерения r_0 (расстояние антенны с разверткой 1 метр от источника). Мощность источника порядка 400 КВ.п.

2⁰. Определим спектр, функции $U^{0D}(r_0, 0, t)$ на основе преобразования Фурье, имеем $\theta(r_0, 0, \omega)$.

3⁰. Разрешив уравнение Риккати, получим

$$\theta^{0D}(r_0, 0, \omega) = \hat{g}(\omega) \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{\sqrt{\nu^2 - (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i\omega \mu_0 \sigma_1) + \sqrt{\nu^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0}}} d\nu \quad (2.8)$$

4⁰. Вычислив интеграл справа (численном методом) в выражении (2.8), получим из последнего значение источника в частотной области, т.е.

$$\hat{g}(\omega) = -\frac{\theta^{0D}(r_0, 0, \omega)}{I}$$

Здесь I- есть значение приближенного вычисления интеграла в выражении (2.8)

5⁰. Значение источника в частотной области $\hat{g}(\omega)$, несет в себе ряд погрешностей технического и вычислительного характера, а именно

усреднение прибором сигнала в результате стробирования. Перевод сигнала из аналогового в цифровой. Очистка сигналов от помех и шумов. Здесь применяется вейвлет преобразования и ряд других фильтров Харра, Добеша. Перевод сигналов из бинарного формата в другой удобный для вычисления. Погрешности приближенного вычисления интеграла, погрешности ввода данных; а именно значения диэлектрической проницаемости и проводимости речного песка неоднородны в слоях, т.е. песок не идеальный, влажный или сухой на определенных участках, встречается примеси с балластом и зернышки песка не равномерно одинаковы.

6⁰. Для восстановленного экспериментального значения источника, используя теорию равномерного приближения функций, построим калибровочную функций $\widehat{G}(\omega; \alpha, \omega_0)$.

7⁰. Пусть оригинал калибровочной функций $\widehat{G}(\omega; \alpha, \omega_0)$ имеет вид:

$$G(t) = e^{-\alpha t} \cos(\omega_0 t)$$

8⁰. В частотной области, на основание Фурье преобразования, имеем

$$\widehat{G}(\omega; \alpha, \omega_0) = \frac{\alpha - i(\omega - \omega_0)}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} ,$$

9⁰. Для определения параметров α, ω_0 рассмотрим квадратичное отклонение:

$$\varphi = \sum_{\omega} |\hat{g}(\omega) - \widehat{G}(\omega; \alpha, \omega_0)|^2 , \underline{\omega} \leq \omega \leq \overline{\omega} \quad (2.9)$$

Здесь значение $\underline{\omega}, \overline{\omega}$ зависит от характеристик радара.

10⁰. Для минимизации квадратичного отклонения (2.9), вычислим производные.

$$\begin{aligned} \varphi &= \sum_{\omega} [\hat{g}^r + i\hat{g}^i - \widehat{G}]^2 \\ &= \sum_{\omega} \left\{ \left[\hat{g}^r - \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right]^2 + \left[\hat{g}^i + \frac{\omega - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right]^2 \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} &= \sum_{\omega} \left\{ 2 \left[\hat{g}^r - \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right] \frac{(-1)(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2) - 2\alpha^2}{(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)^2} \right. \\ &\quad \left. + 2 \left[+ \frac{\omega - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right] \frac{-(\omega - \omega_0)2\alpha}{[\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2]^2} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varphi}{\partial \omega_0} = \sum_{\omega} \left\{ 2 \left[\hat{g}^r - \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right] (+1) \frac{\alpha[2(\omega - \omega_0)]}{(\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2)^2} \right. \\ \left. + 2 \left[\hat{g}^i \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\omega - \omega_0}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \right] \frac{(-1)[\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2] + (\omega - \omega_0)^2 2}{[\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2]^2} \right\}\end{aligned}$$

Построим итерационный процесс по методу сопряженных градиентов.

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \omega_0 \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega_0 \end{bmatrix}^k - S_k P_k$$

$$\text{Где: } P_k = \nabla \varphi[\alpha^k, \omega_0^k] - \beta_k P_{k-1}$$

$$\nabla \varphi = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \omega_0} \end{bmatrix}$$

$$\beta_k = - \frac{\left\| \nabla \varphi[\alpha^k, \omega_0^k] \right\|^2}{\left\| \nabla \varphi[\alpha^{k-1}, \omega_0^{k-1}] \right\|^2}$$

11⁰. Приближение $\alpha^{k+1}, \omega_0^{k+1}$ определим из формул сопряженных градиентов.

12⁰. Окончательно оригинал источник, в результате калибровки, имеет вид

$$G(t) = e^{-\alpha^* t} \cos(\omega_0^* t) \quad (2.10)$$

Здесь: α^*, ω_0^* - значения при которых функционал (2.9), достиг минимума. Значение источника, мы используем для решения прямой задачи, а также обратной по восстановлению диэлектрической проницаемости и проводимости сред [12].

В результате решения предыдущей задачи об определении формы источника мы имеем её калибровочное значение (2.10).

2.2 Математическое моделирование отклика среды

В данном подразделе проведено моделирование отклика среды, подбор соответствующей математической модели. Было

предоставлена возможность выбора реального отклика среды. Апробирован алгоритм по построению функции источника на основе реальных данных георадара. С этой целью использованы результаты экспериментальных исследований, проведенных в полевых условиях с использованием георадара Лоза-В [20]. Проведены эксперименты в двухслойной среде: воздух-песок. Полученный сигнал отклика среды, обработан от помех и шумов, согласно методик, приведенных в работе [21]. В дальнейшем полученная табличная форма сигнала возмущения, будет использована нами для исследования неоднородных сред, в том числе и исследование локализованных объектов. Приведены серии расчетов, для рассматриваемых задач.

При георадиолокационном исследовании прибор регистрирует сигналы, полученные приемной антенной, как набор одиночных трасс, в виде изображения — радарограммы [22-23]. Для решения инженерных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, а исходная радарограмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала от времени пробега. С другой стороны, необходимо очистить сигнал от различного рода шумов, скрывающих полезный сигнал. С этой целью нами для обработки радарограмм используются частотная фильтрация, усреднение сигналов, коррекция амплитуд [21].

Изложим ниже вкратце, алгоритм по восстановлению источника, предложены в работе [24], с целью апробации ее для реальных данных георадаров.

Рассмотрим среду, в которой распределение удельной электрической проводимости подчиняется следующему представлению

$$c^{-2}(z) = \begin{cases} c_0^{-2}, & \text{если } z < 0 \\ c_1^{-2}, & \text{если } z \geq 0 \end{cases}$$

$$c_0, c_1 = \text{const}$$

Здесь c_0 есть скорость распространения сигнала в воздухе, а c_1 — скорость радиосигнала в однородной среде.

В работах [23,25] показано, что в этом случае распределение электрического поля в среде $E_2(z, t) = U(z, t)$ является обобщенным решением задачи Коши:

$$E_{zz} = \frac{1}{c^{-2}(z)} U_{tt} + \mu_0 \Phi^3(t) \delta(z), \quad (z \in R, t > -\infty)$$

$$E_{t<0} \equiv 0$$

и определяется по формуле:

$$E(z, t) = -\frac{\mu_0 c_0 c_1}{c_0 + c_1} \begin{cases} \Phi\left(t + \frac{z}{c_0}\right), & z < 0 \\ \Phi\left(t - \frac{z}{c_0}\right), & z > 0 \end{cases}$$

Функция $U(z, t)$ непрерывна всюду и дважды непрерывно дифференцируема в полупространствах $\mathfrak{R}_-^2 = \{(z, t) | z < 0, t \in \mathfrak{R}\}$, $\mathfrak{R}_+^2 = \{(z, t) | z > 0, t \in \mathfrak{R}\}$ а ее первые производные при $z = 0$ выражаются как

$$U_z(+0, t) = \frac{\mu_0 c_1}{c_0 + c_1} \Phi'(t),$$

то есть

$$U_z(+0, t) - U_z(-0, t) = \mu_0 \Phi'(t) \quad (2.11)$$

Последняя формула (2.11) подтверждает, что вторая производная U_{zz} представляется в виде обобщенной функции $\mu_0 \Phi'(t) \delta(z)$.

Напряженность поля в задаче георадиолокации однородного полупространства определяется формулой [24]:

$$g(t) = U(0, t) = \frac{\mu_0 c_0 c_1}{c_0 + c_1} \Phi(t), \quad (t > 0) \quad (2.12)$$

В георадарных исследованиях показания снимаются с приемной антенны. Из формулы (2.12) следует, что возбуждающий сигнал порождает на границе среды поле, действует на приемную антенну, вызывая в ней переменный ток. Это означает, что показания, регистрируемые прибором, должны быть пропорциональны функции $\Phi(t)$.

Далее возникает задача аппроксимации измеренных на однородном полупространстве данных гладкой функцией. Для интерпретации необходима вторая производная функции $\Phi(t)$. Поэтому желательно аппроксимировать таблично заданные измеренные данные гладкой функцией простого вида, например, следующей [25]:

$$\Phi(t) = A \sin(\omega t + \beta) \exp(-\gamma t) - A \sin \beta \quad (2.13)$$

При приближении данных в этом случае необходимо подобрать параметры ω , β , γ функции (2.13), хорошо согласующиеся с измеренными данными.

2.3. Экспериментальные исследования для определения источника

Экспедиция в составе профессора ЕНУ имени Л.Н Гумилева Исакова К.Т., старшего преподавателя Боранбаева С.А., доктора PhD Миргаликызы Т, и докторанта 2 курса Азиевой Н.Т., 19-20 мая 2019 года провели эксперименты на песчаном карьере ТОО «Нурсат» (директор Жумабаев Даурен), находящейся в 68 км. от города Нур-Султан по Кургальджинской трассе. Проведен комплекс измерений, по приему отраженных сигналов от однородного участка (речной песок) и участка слоистой среды. Эксперимент выполнен геофизическим комплексом серии «Лоза-В», с разверткой антенны: 100 см.

Задача исследования: геофизическое обследование структуры подстилающих слоев однородного чистого песка и слоистой среды; моделирование источника импульса от прибора Лоза-В.; определение спектральных характеристик сигналов, излучаемой антенной.

Интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимы для решения обратных задач по восстановлению источника и геоэлектрического разреза слоистой среды.

Для измерения выбран однородный участок – речной песок, размерами 8 метров в ширину и в длину. Проведен эксперимент: Источник георадара помещен по центру, а антенна располагалась на расстоянии 1 метр.

В качестве экспериментального сигнала взята трасса радарограммы от речного песка. Графики трасс представлены на рисунках 2. Частота дискретизации АЦП георадара серии: «Лоза –В» 2000 МГц. Количество отсчетов равна 512. Временной интервал 0-256 нс. Данные радарограммы, имеющий свой формат, переведены в текстовый формат табличных значений сигналов. На рисунках 2.1 представлено графическое изображение отклика среды.

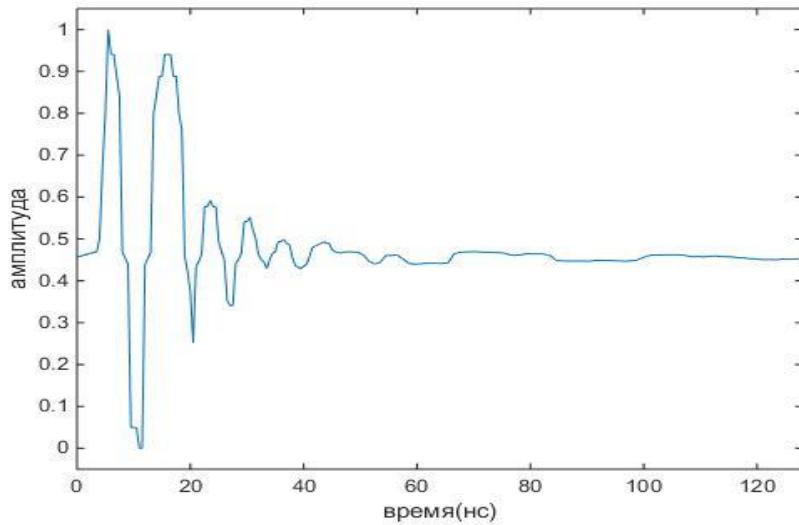


Рисунок 2.1 График трассы радаограммы. Отклик среды .
(Антенна расположена от источника на расстоянии – 1 метр)

Обработка отраженных сигналов от заранее известных образцов Отличительной особенностью нового полигона, состоит в однородности песчаного массива, по масштабу и по глубине, порядка 10-12 метров. Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены 5 объектов, с известными заранее физическими свойствами: диэлектрическая и магнитная проницаемости; проводимости; глубина залегания объектов. Опишем объект: «Однородная среда – чистый песок». Выбран участок в форме квадрата 8 метров в длину и в ширину.

Обработка сигнала: Сигналы получены от георадара серий «Лоза-В» выдаются в формате «geo». Для получения анализа и визуализации сигнала необходимо перейти от бинарного формата файла «geo» в формате «txt». Преобразованный файла «txt» состоит из трех колонок: x , t , Alg . Здесь: x – номер данных полученных от каждой точки, по умолчанию $x=0 \dots 10$; T – time, $T_0=0$ нс, $T_{512}=255,5$ нс, с шагом 0,5 нс.; Alg – значения амплитуды. Длина антенны – 1 м, частота 100 МГц. Значения амплитуды колеблются от 0... 32768. Для визуализации этих сигналов, разработан алгоритм на языке программирования Python. Для создания графиков использована библиотека «Matplotlib». На рисунке 2.2 а) показана обработанная радаограмма в программе «Python» результатов эксперимента с использованием антенны 50 см. График сигнал , в этом случае имеет вид (см. рисунок 2.2 б)).

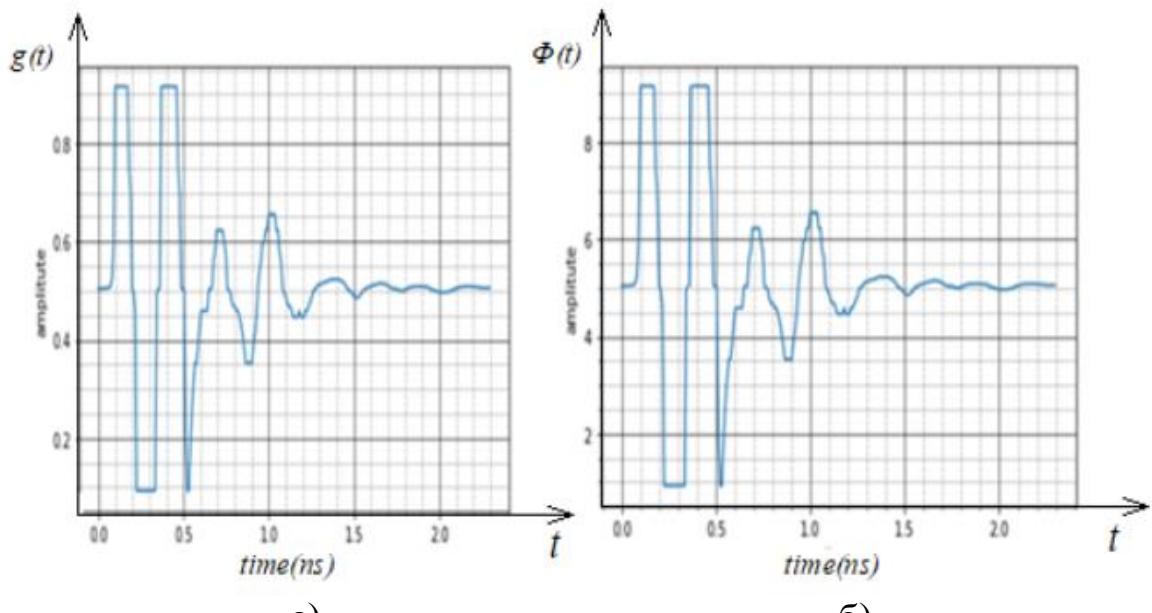


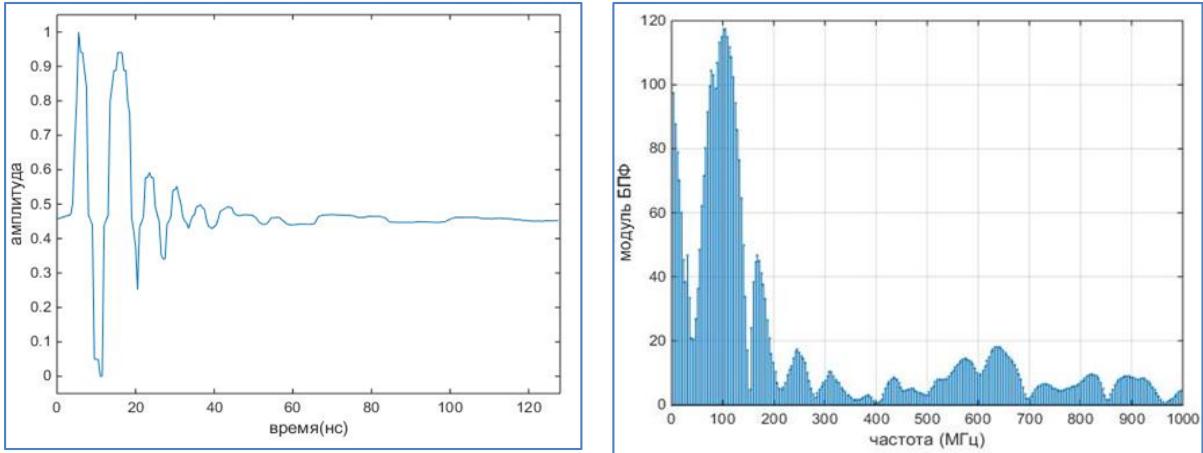
Рисунок 2.2 – а) График отклика среды объекта. б) Сигнал излучаемый георадаром

Численный расчет источника..

Для численного расчета используем ранее полученную формулу в предыдущем подразделе.

$$\vartheta(r_0, 0, \omega) = -\hat{g}(\omega) \int_0^{\infty} \frac{v J_0(vr_0)}{\sqrt{v^2 - (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i \omega \mu_0 \sigma_1)} + \sqrt{v^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0}} dv \quad (2.14)$$

Проведены три эксперимента: источник георадара помещен в центре участка, а антenna располагалась на расстоянии 1 метр, 2 метра, 3 метра (эксперименты №1, №2, №3). Частота дискретизации АЦП георадара серии: «Лоза–В» 2000 МГц. Количество отсчетов равно 512. Временной интервал 0-256 нс. Данные радарограммы, имеющий свой бинарный формат, переведены в текстовый формат табличных значений сигналов. На рисунке 2.3 а) в качестве примера представлено графическое изображение отклика эксперимента №1.



а)

б)

Рисунок 2.3 – а) График трассы радараграммы. Отклик среды в результате эксперимента №1 б) Спектр трассы радарограммы, по данным эксперимента №1

Спектр трассы радаграммы, эксперимента 1 (отклика среды), представлен на рисунке 2.3 б). Частотная шкала графика изменяется от 0 до 1000 МГц. Модуль значений частотного распределения сигнала $\vartheta(r_0, 0, \omega)$ видно на рисунке 2.3 б).

Интеграл от комплексной функции в уравнении (2.14) представим в виде:

$$\int_0^{\infty} \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{\sqrt{\nu^2 - (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 - i \omega \mu_0 \sigma_1)} + \sqrt{\nu^2 - \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0}} d\nu = \int_0^{\infty} (p(\nu) + iq(\nu)) d\nu = \int_0^{\infty} f(\nu) d\nu \quad (2.15)$$

Численный расчет интеграла (2.15) реализуется итерационным методом прямоугольников (или трапеции). 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 2.4 а).

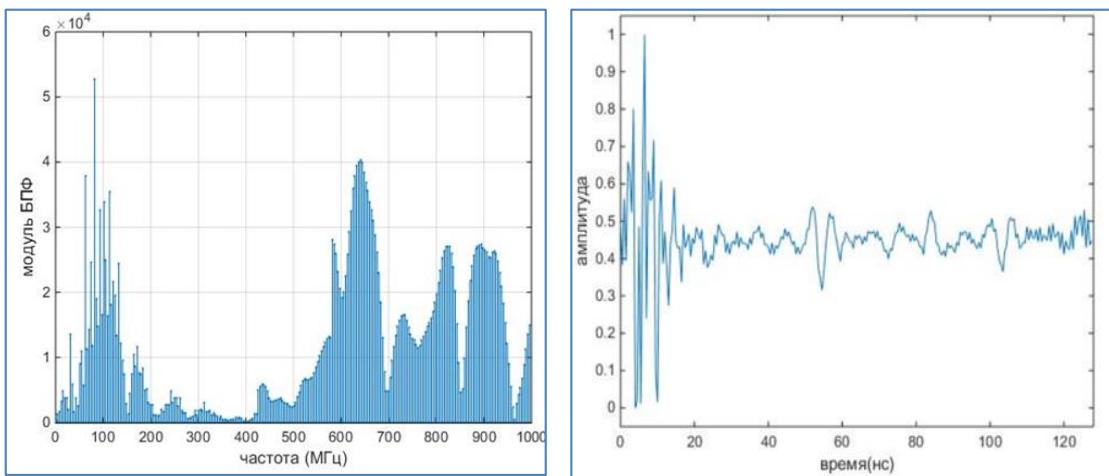


Рисунок 2.4 – а) График спектра источника сигнала, для эксперимента №1

б) График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента №1

Обратным преобразованием Фурье спектра $g(\omega)$ находим абсолютный сигнал источника (комплексный). График действительной части сигнала источника, в случае эксперимента №1 представлен на рисунке 2.4 б).

Анализ: В данном разделе получены реальные данные георадара «Лоза-В», на новом лабораторном полигоне (песчаный карьер - ТОО «Нурсат»), в результате измерений проведенных над искусственными объектами. Отличительной особенностью этого полигона, состоит в том, что выбраны абсолютно однородный массив речного песка – «песчаный карьер», глубина залежи песчаного массива порядка 10-12 [м].

Данные георадара, преобразованы от бинарный формы в табличный. Аппробирована два алгоритма восстановления источника возмущения излучаемым георадаром. Как и следовало ожидать, отклик среди пропорционален источнику возмущения, что соответствует поведению решения прямой задачи электродинамики в волновой постановке. Алгоритм испытанный на данных другого эксперимента, в котором приемник располагали на расстоянии с шагом один метр, получен восстановленный сигнал имеющий игольчатый вид. Как видно из полученных результатов расчета исходный сигнал передавшей антенны имеет широкий спектр и длительность зондирующего импульса составляет 0,5-10 нс. В таких случаях

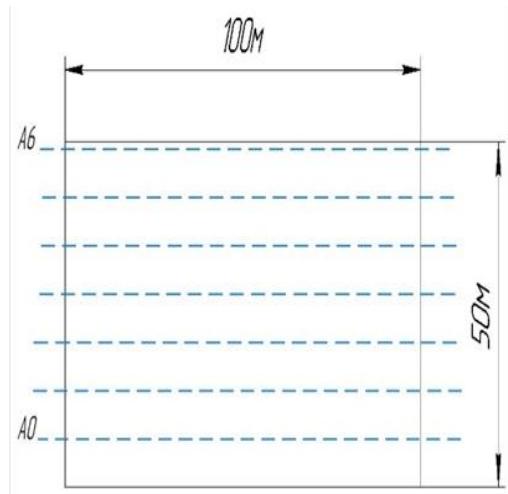
экспериментаторы, вводят коллибровочную функцию, либо сглаживают тем или иным способом.

Результаты исследований по данному разделу опубликованы в работе [26].

2.4. Экспериментальные исследования для определения отклика

Для моделирования источника излучаемым георадаром Лоза-В, выбран участок песчаного карьера, с заранее известным геоэлектрическим разрезом. По данным георадара, а именно дополнительной информации впоследствии будет решена обратная задача по моделированию источника. Проведены эксперименты с применением различных антенн. Экспедиция в составе профессора Евразийского национального университета имени Л.Н Гумилева Исакова К.Т. и старшего преподавателя Казахского национального педагогического университета имени Абая Шолпанбаева Б.Б., 4 января 2019 года провели экспериментальные исследования на песчаном карьере «ТОО Бек», находящейся в 30 км. от города Алматы по направлению в сторону г. Капчагая.

Задачи исследования: определение спектральных характеристик сигналов, излучаемых антеннами: 0.5 м, 1 м, 1.5 м., 3 метра; интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по восстановлению источника. Эксперимент №1. Использована антenna с разверткой 1.5 метра. На участке 25*100 (м) отмечено 7 трасс. По каждой трассе проведено 49 измерений с шагом шаг 0,2-0,25 (м). Расстояние между трассами 0,5 метра. На рисунке 2.5 а) отмечено 7 трасс и геофайлы обозначено как: А0-А6 на рисунке 2.5 б) процесс измерения. Для обработки геофайлов использована стандартная программа «Крот», встроенная в георадар «Лоза-В». Аналогичные измерения проведены с антенной разверткой: 1 (м) - Эксперимент №2. Эксперимент №3. - измерения проведены с антенной разверткой: 0,5 (м). Эксперимент №4. - измерения с антенной 3 м, с шагом 3 метра (см. рисунок 2.5 а).



а)

б)

Рисунок 2.5 – а) Схема трасс. б) Измерения с прибором «Лоза-В». Члены экспедиции: Искаков К.Т., Шолпанбаев Б.Б.



а)

б)

Рисунок 2.6 – Измерения к эксперимента №4, №5. а) Измерения антенной с разверткой – 3 (м). б) Измерения на холме антенной с разверткой – 0,5 (м)

На рисунке 2.6 б) в качестве доказательства, что эксперименты проведены в однородной среде, выбран участок, где отчетливо виден срез среды – однородный песок. На этом холме, проведены измерения по трем трассам антенной с разверткой 0,5 метра.

Радарограммы отклика и ее спектральный анализ

Результаты георадарного исследования – это георадиолокационные профили (радарограмма), содержащие отражения от границ раздела сред с различными электрофизическими параметрами. Спектр радарограммы вычисляется алгоритмами быстрого преобразования Фурье [22,28]. Спектральный анализ радарограмм выполняется с целью выяснения отношений сигнал/шум.

Полученные геофайлы всех проведенных измерений экспериментов №1-№5, обработаны программой «Крот». В качестве примера, приведем данные эксперимента №1: радарограмма рисунок 2.7; график трасс радарограммы рисунок 2.8 а); график спектра рисунок 2.8 б).

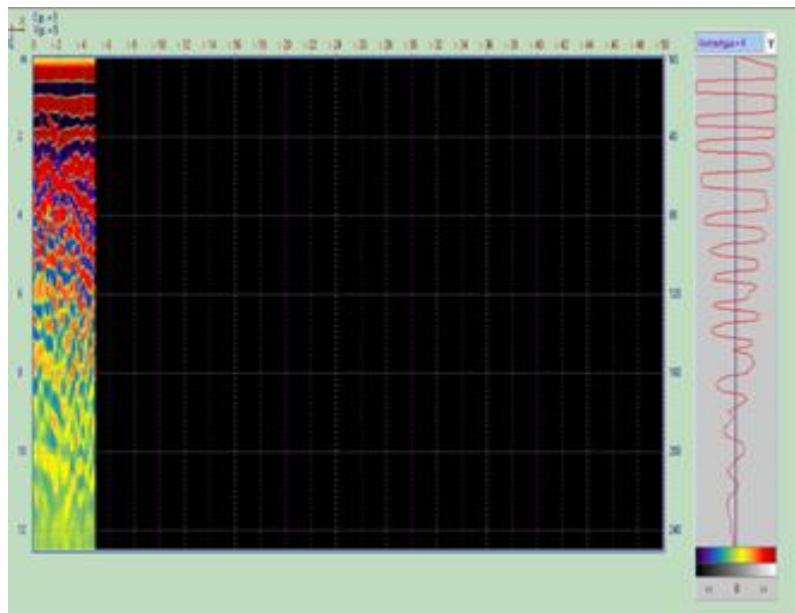


Рисунок 2.7 – Радарограмма эксперимента №1

На рисунке 2.7 приведен отклик среды. Максимальное отклонение амплитуды сигнала отмечены красным цветом, а отклонение амплитуды ниже оси отмечены синим цветом. В связи с этим слева указаны палитра измерений по точкам наблюдений.

Графики трасс и спектров радарограмм обработанных алгоритмом преобразованием Фурье, представлены на рисунке 2.8.

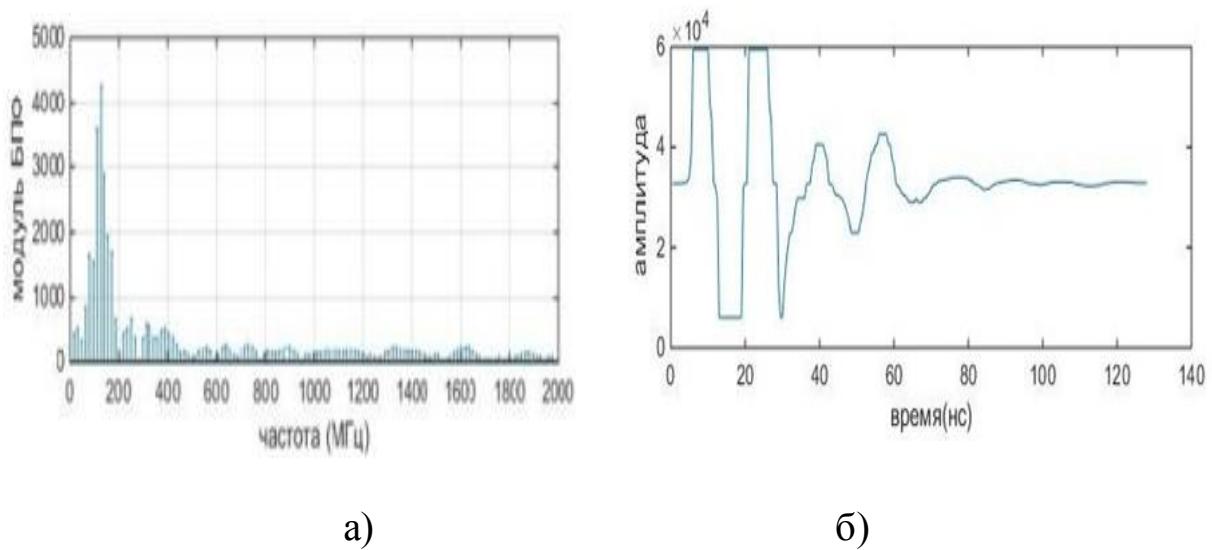


Рисунок 2.8 – а) Графики трассы (антенна 1,5 м., 100 МГц) б) спектр радарограмм

Вывод. Радарограмма является сверхширокополосным радиосигналом. Как видно из графиков основные влияющие на амплитуду сигнала спектральные составляющие радарограммы расположены вокруг центральной частоты антенны георадара. Основная информация о подповерхностной среде заключена в амплитуде сигнала в соответствующей времени получения сигнала.

В результате интерпретации радарограмм, получены серии откликов сред, с применением различных антенн, которые будут использованы для решения обратных задач по восстановлению источника: табличные значения. Проведен спектральный анализ, полученных радарограмм с применением пакета программ.

Список использованных источников к Разделу 2:

1. Романов В.Г., Кабанихин С.И., Обратные задачи геоэлектрики. /М.Наука. 1991 -304 с.
2. Тихонов А.Н., Арсений В.Я. Методы решения некорректных задач. //М.: Наука, 1979 - 285 с.
3. Романов В.Г. Обратные задачи математической физики. //М.: Наука, 1984 - 264 с.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. //М. Наука. 1977 г. - 656 с.
5. Атанов С.К. «Применение георадаров для решения задач электродинамики слоистых сред подповерхностных покрытий на территории Казахстана» //Конференция «ГЕОРАДАР-2018», 12-13

марта,

Москва,

2018.

http://georadarconf.ru/conf2018/agenda/Primenenie_georadarov_dlya_resheniya_zadach/

6. Токсейт Д.К., Исаков К.Т. Алгоритм численного решения прямой задачи электродинамики //Сборник докладов «Труды V Международной научно-практической конференции «интеллектуальные информационные и коммуникационные технологии – средство осуществления третьей индустриальной революции в свете стратегии «Казахстан-2050»» - 22 февраля 2018 г. – г. Астана, 2018. – С. 236-239

7. Есебаева Б.Е., Кусаинова А.Т., Применение информационных технологий для решения задач геофизики //Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург–Астана–Киев–Вена, «30» января 2018 года) /Международный научный центр, 2018. – С. 30-34.

8. Исаков К.Т., Кусаинова А.Т., Алгоритм численного решения прямой задачи для формирования класса «физических полей». //Международный казахско-турецкий университет Имени Ходжи Ахмеда Ясави, Научная конференция математиков Казахстана, Актуальные проблемы математики, 2018. - С. 50 – 53

9. Турагова М.К., Ұзаққызы Н., Нуржанова А.Б., Исаков К.Т. Алгоритм решения прямой задачи геоэлектрики в вертикально неоднородной среде //Сборник материалов XIII Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука и образование - 2018». – 12 апреля 2018 г. – г. Астана, 2018. - С. 953-988

10. Есебаева Б.Е., Кусаинова А.Т., Применение информационных технологий для решения задач геофизики //Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург–Астана–Киев–Вена, «30» января 2018 года) //Международный научный центр, 2018. – С. 30-34.

11. Тихонов А.Н., Арсений В.Я. Методы решения некорректных задач. //М.: Наука, 1979 - 285 с.

12. Кабанихин С.И., Исаков К.Т. Оптимизационные методы решения коэффициентных обратных задач. – Новосибирск, 2001. – 316 с.

13. Исаков К.Т., Кусаинова А.Т. Алгоритм решения прямой задачи геоэлектрики в вертикально неоднородной среде

//Международный казахско-турецкий университет Имени Ходжи Ахмеда Ясави, Научная конференция математиков Казахстана, Актуальные проблемы математики, 2018. - С. 90 – 93

14. Андриянов А.В. и др. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005 – 416 с.: ил.

15. Манштейн А. К. Малоглубинная геофизика: Учеб. пос. по спецкурсу. Новосибирский гос. ун-т / Новосибирск, 2002

16. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме, Журнал «Геофизика», №4, 2010, С.76-80.

17. Копейкин В.В. Рефракция волн в линейных средах с частотной дисперсией – М.: Наука, 2007 – 142 с.

18. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.А., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М., Сов. Радио, 1977, 176 с.

19. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. - М.: Недра, 1986. - 128 с

20. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М., Радио и Связь, 1994, 216 с.

21. Conyers, Lawrence B. And Dean Goodman, Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. Walnut Creek, CA.: Altamira Press, 1997.

22. Ground Penetrating Radar: Theory And Applications / edited by Harry M. Jol. Elsevier, Amsterdam 2009, ISBN 978-0-444-53348-7.

23. Ground Penetrating Radar / edited by David J. Daniels. London, 2004 ISBN 0-86341-360-9.

24. Кабанихин С.И., Исаков К.Т. Оптимизационный метод решения коэффициентных обратных задач. Новосибирск. Издательство НГУ. 2001, 316с.

25. Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н., Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах // Известия АН СССР, сер. Геофизическая, 1956, № 3, с. 251-254.

26. Дмитриев В.И., Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде // Вычислительные методы и программирование, 1968, т. 10, с. 55-65.

27. Карчевский А.Л., Метод численного решения системы упругости для горизонтально слоистой анизотропной среды // Геология и Геофизика, 2005, т. 46, № 3, с. 339-351.

28. Карчевский А.Л., Прямая динамическая задача сейсмики для горизонтально-слоистых сред // Сибирские Электронные Математические Известия, 2005, т.2, с. 23-61.

3. АЛГОРИТМЫ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

Электромагнитные импульсы, возникающие в результате возбуждения передающей антенны генератором наносекундных импульсов, распространяются в зондируемой среде. Приемная антенна принимает данные сигналы, преобразует электромагнитный отклик в электрический сигнал. Полученный сигнал оцифровывается и передается в блок цифровой обработки (возможно компьютер), где проводится первичная обработка сигнала, запись во встроенную память для последующей обработки и визуализации.

Генераторная часть прибора обеспечивает возбуждение зондирующих импульсов в генераторной антенне на различных частотах.

Измерительная часть прибора обеспечивает регистрацию отраженных волн с приемной антенны, автоматическую временную регулировку усиления, стробирование и оцифровку сигнала.

В первом подразделе приведены классические алгоритмы обработки сигналов для георадиолокационных систем на основе Фурье-преобразований. Семейство преобразований Фурье включает в себя: преобразование Фурье; ряды Фурье; дискретные ряды Фурье; дискретное преобразование Фурье; Быстрое преобразование Фурье.

Во втором подразделе рассматриваются методы снижения уровня шума при обработке реальных данных георадара. Приведены обработки радарограмм цифровыми фильтрами Баттервортса и в целом процедура выполнения цифровой фильтрации на реальных данных георадара серии «Лоза-В».

Для решения прикладных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, а исходная радарограмма выражает зависимость амплитуды сигнала от времени отражения. Затем необходимо избавиться от различных помех, скрывающих полезный сигнал.

С этой целью рассматриваются алгоритмы снижения уровня шума в радарограмме с использованием различных вейвлетов. Использовались: вейвлет Хаара и вейвлеты Добеши 4 - порядка. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени и неоднородных в пространстве. Результаты анализа должны содержать частотную характеристику сигнала распределение энергии сигнала по

частотным составляющим. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов.

В третьем подразделе приводится модуль реализации алгоритмов первичной обработки георадарных данных и алгоритм программного модуля по определению глубины залегания и диэлектрической проницаемости объектов полигона.

В результате исследования подповерхностной среды, получим множество сигналов, полученных от приемной антенны для каждого измерения георадаром. Множество таких трасс визуализируется методом переменной плотности в виде изображения. Разработан программный модуль определения глубины залегания объектов и относительной диэлектрической проницаемости подповерхностной среды. Местоположения подповерхностного объекта определяется вершиной гиперболы построенного по точкам максимальных значений амплитуд каждой трассы.

3.1 Алгоритмы обработки сигналов для георадиолокационных систем на основе Фурье-преобразований

Преобразование Фурье. На сегодняшний день преобразование Фурье используется во многих областях науки – георадиолокации, физики, цифровой обработке сигналов и изображений и т.д. Преобразование Фурье – это разложение функций на синусоиды. Если рассмотреть, то преобразование Фурье позволяет сопоставить сигналу, заданному во временной области, его эквивалентное представление в частотной области.

Обратное преобразование Фурье позволяет определить соответствующий сигнал во временной области при известной частотной характеристики сигнала.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ)

Современную технику связи невозможно представить без спектрального анализа. Представление сигналов в частотной области необходимо как для анализа их характеристик, так и для анализа блоков и узлов приемопередатчиков систем радиосвязи. Для преобразования сигналов в частотную область применяется прямое преобразование Фурье:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i2\pi ft} x(t) dt \quad (3.1)$$

Как видно из формулы (3.1) для частотного анализа производится вычисление корреляционной зависимости между сигналом, представленным во временной области и комплексной экспонентой с заданной частотой. При этом по формуле Эйлера комплексная экспонента разлагается на реальную и мнимую часть:

$$e^{-i2\pi ft} = \cos(2\pi \cdot f \cdot t) - i \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Сигнал, представленный в частотной области можно снова перевести во временное представление при помощи обратного преобразования Фурье. Обобщенная формула обратного преобразования Фурье:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i2\pi ft} S(f) df \quad (3.2)$$

В формуле (3.2) используется интегрирование по времени от минус бесконечности до бесконечности. В реальных условиях мы можем провести интегрирование от данного момента времени, который мы можем обозначить за 0, до момента времени Т. Формула прямого преобразования Фурье преобразована к следующему виду:

$$S(f) = \int_0^T e^{-i2\pi ft} x(t) dt \quad (3.3)$$

В результате существенно меняются свойства преобразования Фурье. Спектр сигнала вместо непрерывной функции становится дискретным рядом значений. Минимальный частота и шаг частотных значений спектра сигнала становится:

$$f_{\min} = \Delta f = \frac{1}{T}; \quad \Omega = \frac{2\pi}{T}$$

Только функции \sin и \cos с частотами k/T будут взаимно ортогональны, а это является непременным условием преобразования Фурье. Набор первых функций разложения в ряд Фурье приведен на рисунке 3.1. При этом длительность функций совпадает с длительностью анализа T .

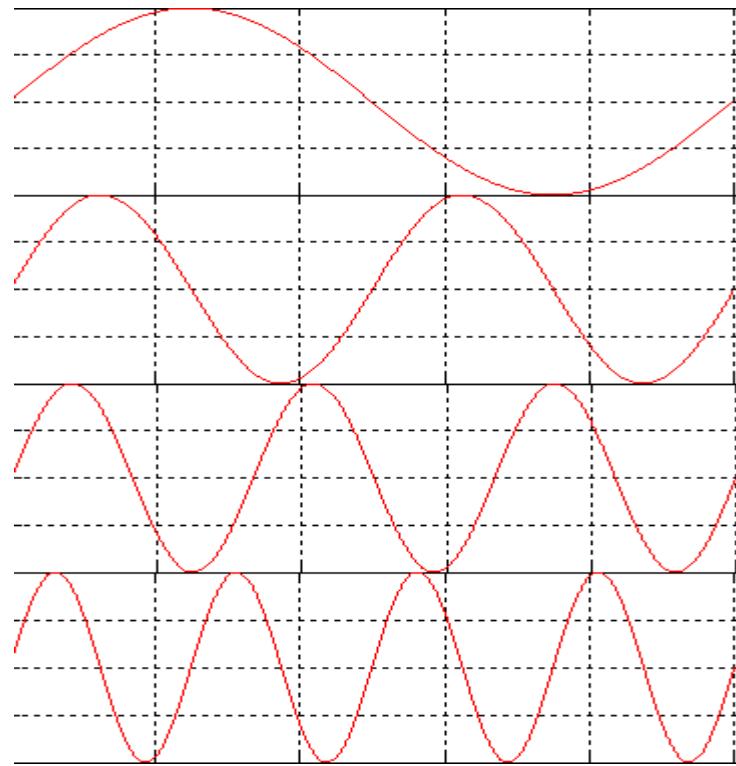


Рисунок 3.1 – Функции разложения в ряд Фурье

Спектр сигнала показан на рисунке 3.2.

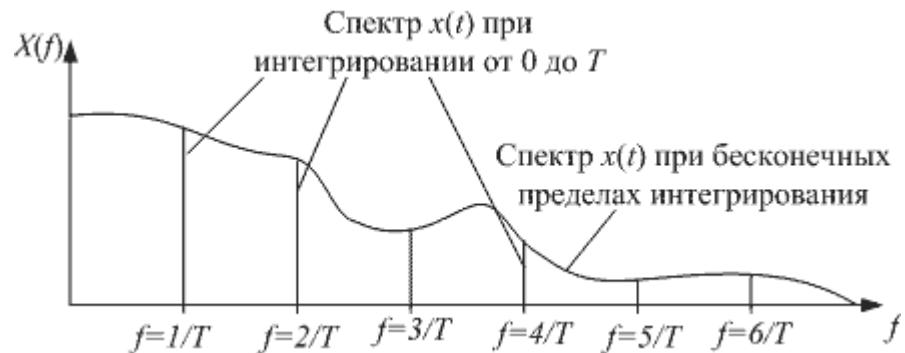


Рисунок 3.2 – Спектр функции $x(t)$ при анализе на ограниченном интервале времени

Формула вычисления прямого преобразования Фурье (3.3) преобразуется к виду:

$$X(k) = \int_0^T e^{-i \frac{2\pi k}{T} t} x(t) dt \quad (3.4)$$

Формула обратного преобразования Фурье для случая определения спектра на ограниченном отрезке времени имеет вид:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{i \frac{2\pi k}{T} t} X(k) \quad (3.5)$$

Преобразование Фурье для цифровых отсчетов сигнала называется дискретным преобразованием Фурье и записывается следующим образом:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i \frac{2\pi}{T} n} x(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{T} kn\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{T} kn\right) \right] x(n) \quad (3.6)$$

В результате для полного описания спектра цифрового сигнала требуется N частотных отсчетов ($k = 0, \dots, N/2$).

Быстрое преобразование Фурье. Разобьем исходный сигнал $x(n)$ на несколько последовательностей меньшей длины. В простейшем случае это будет две последовательности: четные отсчеты сигнала и нечетные отсчеты входного сигнала. Такой алгоритм вычисления спектра получил название быстрое преобразование Фурье с прореживанием по времени на 2.

Пусть количество отсчетов цифрового сигнала $x(n)$ будет равно N . Тогда дискретное преобразование Фурье временной последовательности $x(n)$ будет записываться следующим образом:

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

Комплексную частоту $e^{-j\omega}$ заменим переменной W :

$$W_N^k = e^{-j \frac{2\pi k}{N}}$$

Тогда формула дискретного преобразования Фурье имеет вид:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}$$

Последовательность четных и нечетных отсчетов сигнала $x(n)$ запишем в виде:

$$x_1(n) = x(2n), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

$$x_2(n) = x(2n+1), \quad n = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$$

Выразив дискретное преобразование Фурье через дискретные преобразования Фурье четных и нечетных последовательностей входных отсчетов сигнала, получим:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n) W_N^{2nk} + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1) W_N^{2nk} W_N^k$$

График комплексной экспоненты W_N приведен на рисунке 3.3

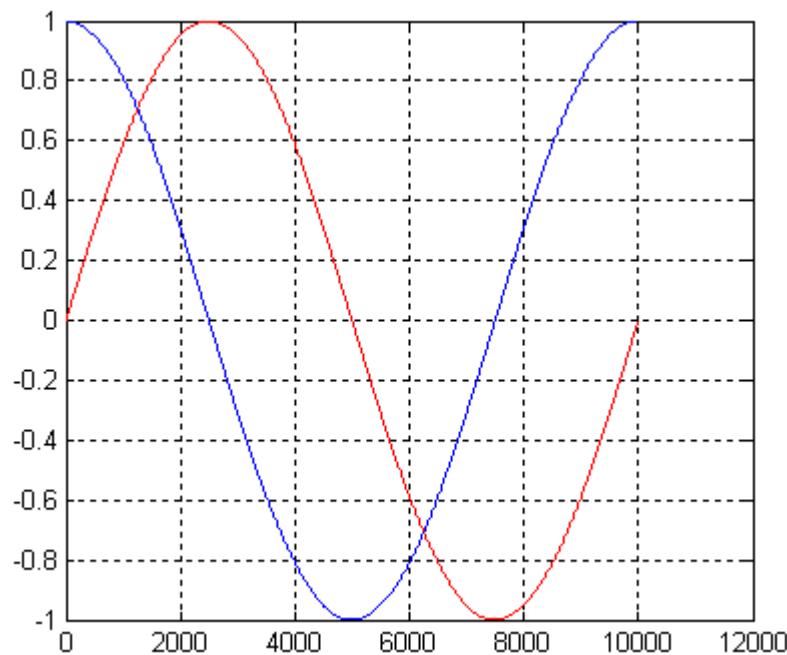


Рисунок 3.3 – Графики реальной и мнимой составляющих комплексной экспоненты W_N

Из графика видно, что $\sin(n+N/2) = -\sin(n)$ и $\cos(n+N/2) = -\cos(n)$. В результате этого свойства комплексной экспоненты все частотные отсчеты от 0 до $N/2-1$ можно вычислить, просуммировав частотные отсчеты четного и нечетного ДПФ, а частотные отсчеты от $N/2$ до $N-1$ — вычислив разность. Граф вычисления быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени на 2 приведен на рисунке 3.4.

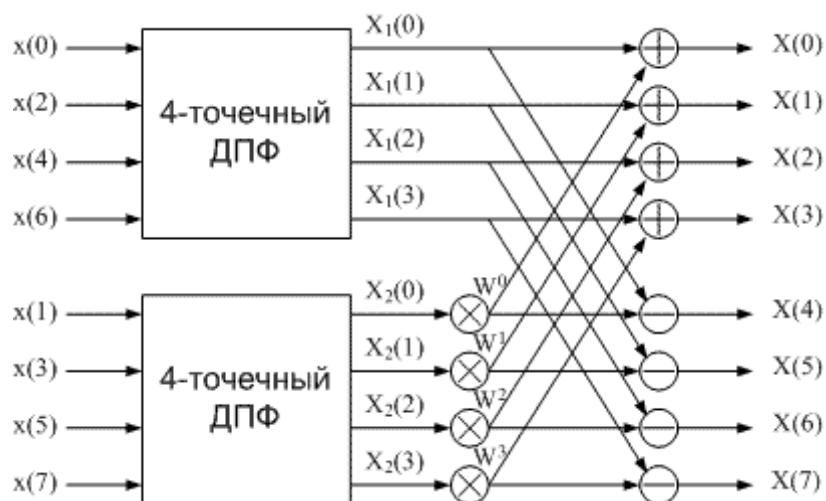


Рисунок 3.4 – Граф вычисления быстрого преобразования Фурье

Если количество отсчетов (точек) в исходных ДПФ будет снова четным числом, то их, в свою очередь, можно будет разбить на четные и нечетные последовательности временных отсчетов. Это снова позволит сократить количество операций комплексного умножения. Граф быстрого преобразования Фурье при этом примет вид, изображенный на рисунке 3.5.

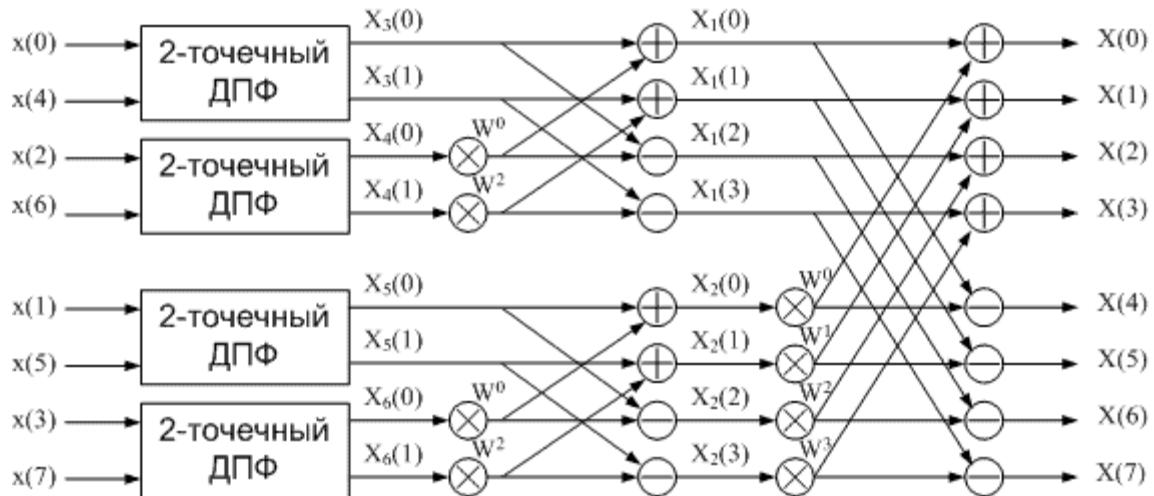


Рисунок 3.5 – Улучшенный график вычисления быстрого преобразования Фурье

Для окончательного алгоритма 8-ми точечного быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени график будет выглядеть, как это показано на рисунке 3.6.

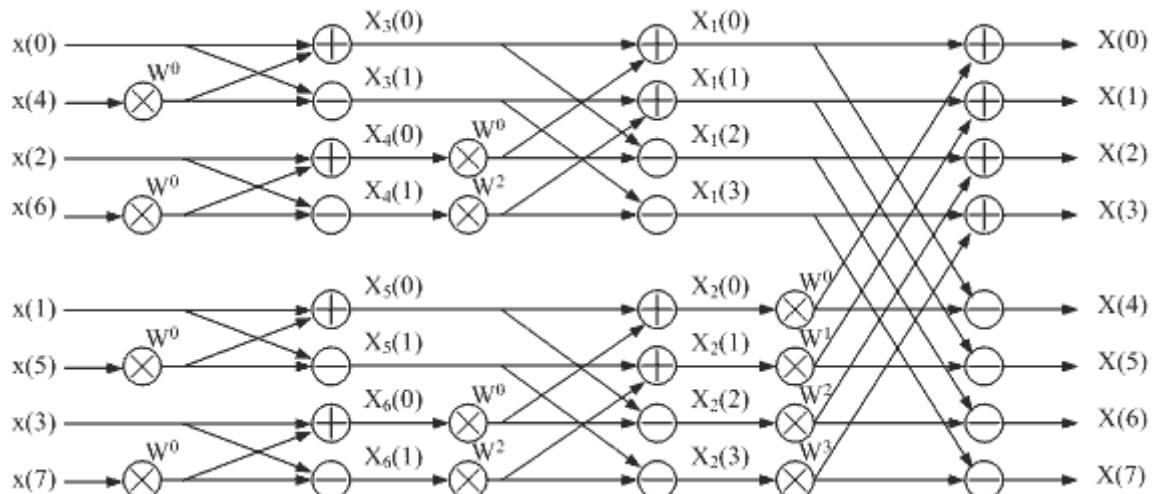


Рисунок 3.6 – Окончательный график вычисления быстрого преобразования Фурье

Общее количество операций комплексного умножения для вычисления БПФ потребуется:

$$N_{\text{оп}} = N/2 \times \log_2 N$$

3.2 Обработка радарограммы цифровыми фильтрами Баттерворта

В данном подразделе рассматриваются алгоритмы снижения уровня шума в радарограмме с использованием различных фильтров. Результатом георадиолокационного обследования является набор одиночных трасс (сигналов), зарегистрированных приемной антенной при каждом положении георадара.

При прохождении георадиолокационного импульса в среде на его характеристики влияют различные параметры (влажность и плотность пород, форма, размеры, взаимное расположение и ориентация минеральных зёрен или частиц и т.п.), которые отражаются на таких электрофизических свойствах пород, как диэлектрическая проницаемость и электропроводимость. От них зависят значения амплитуд, время задержки и частотный состав регистрируемых сигналов.

Первичная обработка радарограмм состоит из частотной фильтрации, усреднении сигналов, коррекции амплитуд, преобразовании Гильберта. Окончательным этапом обработки радарограмм является интерпретация, на котором непосредственно решается поставленная инженерная задача. При интерпретации анализируются основные особенности волновой картины и её локальные особенности.

Интерпретация георадарных данных представляет собой достаточно сложную творческую задачу, поскольку теоретическая база метода математический аппарат, применяемый на стадии интерпретации разработаны слабо. Помимо этого, многие объекты приложения радиолокационного метода - подземные инженерные конструкции, археологические и другие объекты, обычно отличаются сложным и неоднородным строением, содержат множество различных включений и неоднородностей, неравномерно и прерывисто увлажнены, что создает сложную волновую картину на радарограмме и затрудняет сопоставление геофизических аномалий с реальными подповерхностными объектами.

Одним из этапов предварительной обработки радарограммы является фильтрация аппаратурных электрических шумов

систематического и случайного характера [1,4]. Методика обработки георадиолокационных данных состоит, прежде всего, в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. Одним из современных подходов к очищению сигналов георадара в качестве математического аппарата выбрано частотная фильтрация сигналов, применение которого позволяет ослабить помеху и шум, без ослабления и искажения сигнала.

Результатом георадиолокационного обследования является набор одиночных трасс (сигналов), зарегистрированных приемной антенной при каждом положении георадара. Радарограмма сканирования бочки получена георадаром Лоза. График одиночной трассы этой радарограммы представлен на рисунке 3.7.

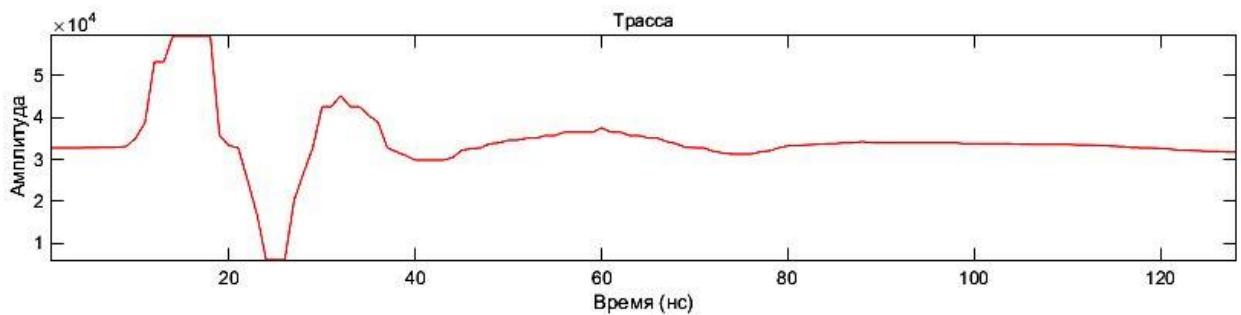


Рисунок 3.7 – График трассы радарограммы

Эти фильтры характеризуются тем, что их АЧХ являются максимально плоской в полосе пропускания. Выражение для квадрата фильтра Баттервортса n-го порядка имеет вид [5]:

$$|K_a(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2n}}$$

а при введении нормированной к частоте среза Ω_c частоты $x = \Omega / \Omega_c$

$$|K_a(jx)|^2 = \frac{1}{1 + x^{2n}}$$

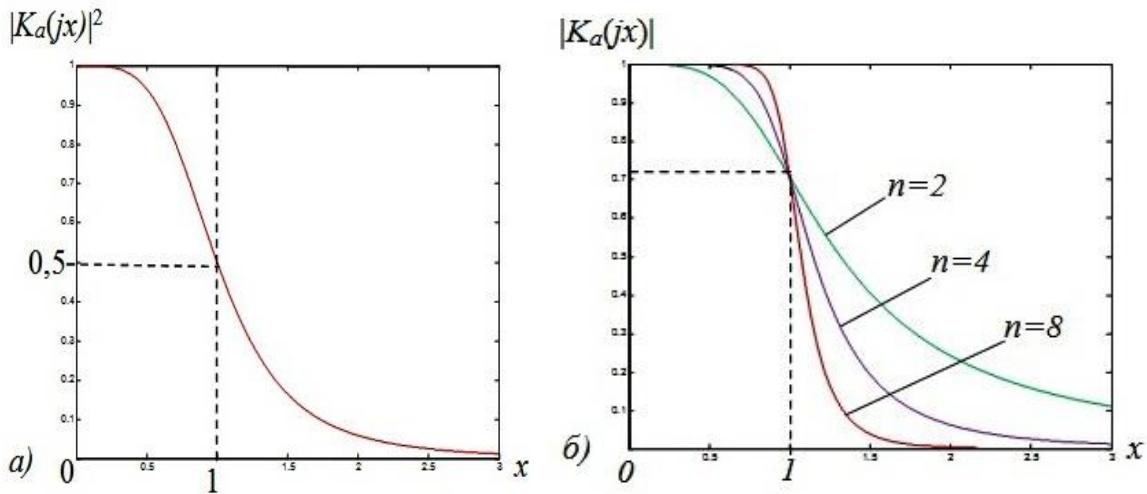


Рисунок 3.8 – График квадрата АЧХ, и график зависимости АЧХ фильтра Баттерворт от его порядка n

На рисунке 3.8 а) представлен график квадрата АЧХ, а на рисунке 3.8 б отображает зависимость АЧХ фильтра Баттерворт от его порядка n . Аналитически продолжая $K_a(jx)$ на комплексную плоскость p , заменив в $jx=p$, $x^2=(-1)p^2$ получим

$$|K_a(p)|^2 = \frac{1}{1 + (-1)^n p^{2n}}$$

Полюсы этой функции находятся из уравнения:

$$p^{2n} (-1)^n + 1 = 0, p^{2n} = (-1)^{-(n-1)}$$

Поскольку

$$(-1) = e^{j\pi}, (-1)^{n-1} = e^{j\pi(n-1)} e^{-j2k\pi},$$

где k - любое целое число, то для k -го корня получаем соотношение

$$P_k = e^{j\pi[(n-1)+2k]/2n}, \quad k = 1, 2, \dots, 2n,$$

причем число корней равно $2n$. Очевидно, что все полюсы находятся на единичной окружности в $-$ -плоскости, на одинаковом угловом расстоянии друг от друга, поскольку модули равны 1, а аргументы

$$\varphi_k = \frac{\pi[n + (2k - 1)]}{2n} = \pi \left[\frac{1}{2} + (2k - 1)/2n \right]$$

Синтез цифрового фильтра включает синтез передаточной функции и структуры фильтра по заданной его частотной или импульсной характеристики и оценку требуемой разрядности чисел для коэффициентов фильтра и отсчетов входного, выходного и внутренних сигналов.

Расчет цифрового фильтра Баттерворта проведена на основе билинейного преобразования метод билинейного преобразования (метод инвариантности частотных характеристик) [6]-[8].

Параметры рассчитанного фильтра шестого порядка:

Коэффициенты передаточной функции			
A1	A2	B1	B2
-1,3143182	0,714895368	2	1
-1,05406201	0,375318443	2	1
-0,945920026	0,234217004	2	1
H0=0,000579693109			

Передаточная функция фильтра:

$$H(z) = \frac{0.0005797(1+2z^{-1}+z^{-2})(1+2z^{-1}+z^{-2})(1+2z^{-1}+z^{-2})}{(1-1.3143z^{-1}+0.7149z^{-2})(1-1.0541z^{-1}+0.3753z^{-2})(1-0.9459z^{-1}+0.2342z^{-2})}$$

Полосовой фильтр можно представить как последовательное соединение ВЧ- и НЧ-фильтров — он пропускает только определённую полосу частот и подавляет оставшуюся часть сигнала (рис. 3.9). Это значит, что он характеризуется двумя частотами пропускания и двумя частотами подавления и имеет соответственно две зоны подавления и одну пропускания. Передаточная характеристика фильтра приведена на рисунке. 3.9



Рисунок.3.9 – Передаточная характеристика фильтра Баттервортса

На рисунках 3.10 и 3.11 представлены графики АЧХ и характеристики затухания цифрового фильтра Баттервортса.

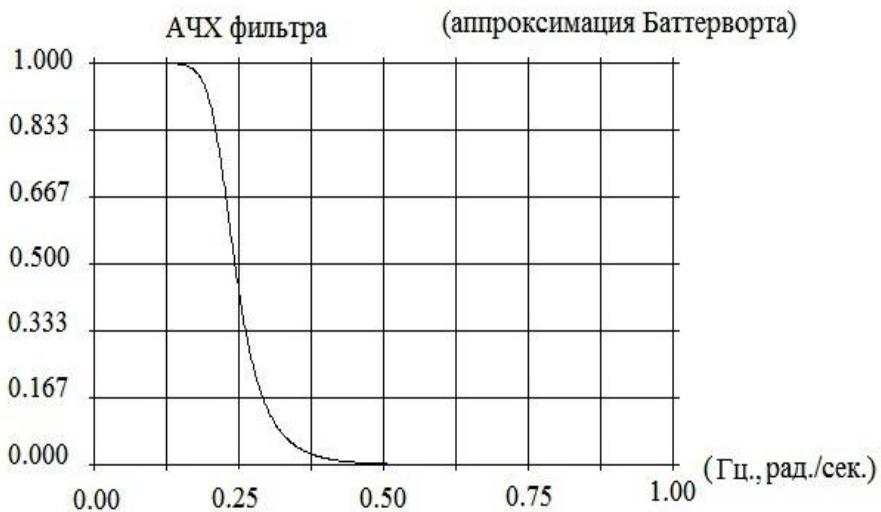


Рисунок 3.10 – АЧХ цифрового фильтра Баттервортта

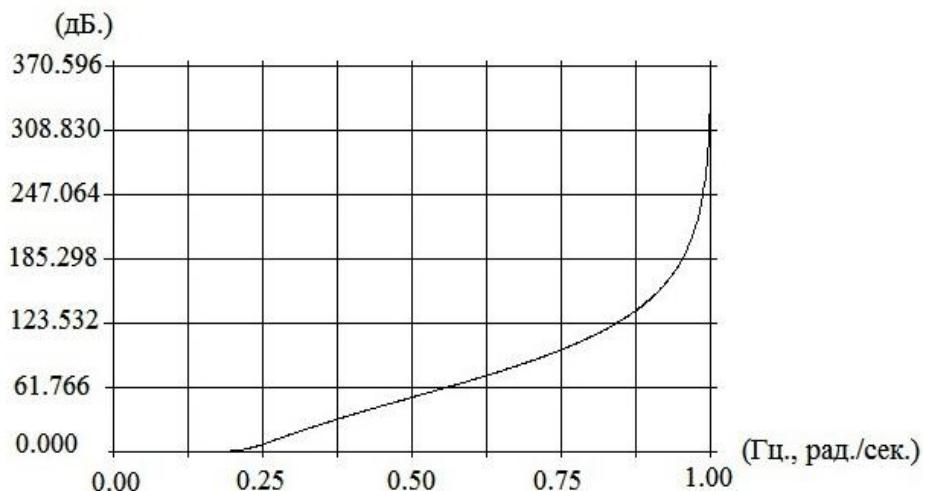


Рисунок 3.11 – Характеристика затухания цифрового фильтра Баттервортта

Процедура выполнения цифровой фильтрации

Большинство фильтров работают не с самим сигналом, а с его спектром. Если вычислить спектр сигнала, удалить из него (или существенно уменьшить) определенные частоты, а затем выполнить обратное преобразование Фурье, то результатом будет фильтрованный сигнал. Эта процедура производится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала [7]-[8].

На рисунке 3.12 приведена график модуля спектра трассы радарограммы полученное БПФ.

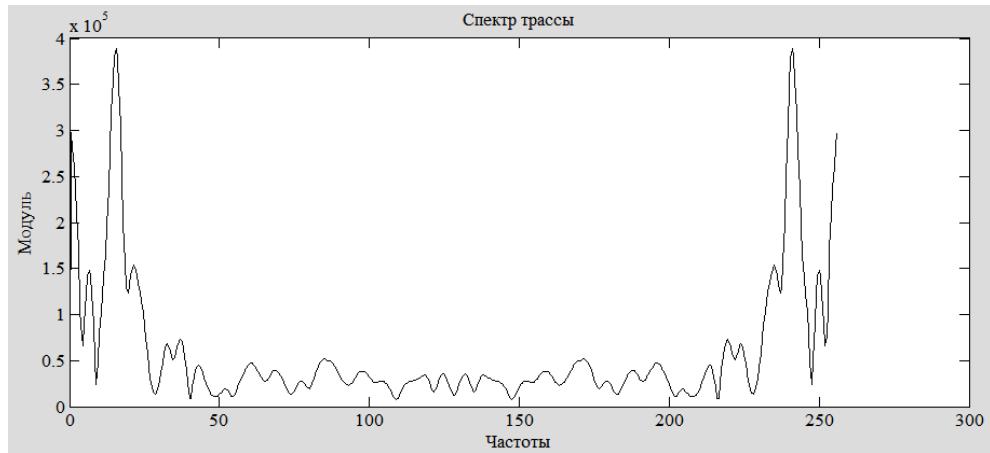


Рисунок 3.12 – График модуля спектра трассы радарограммы

Полученный комплексный спектр трассы умножается на комплексный спектр фильтра и результат подвергается обратному преобразованию Фурье. На рисунке 3.13 представлен график фильтрованной трассы радарограммы.

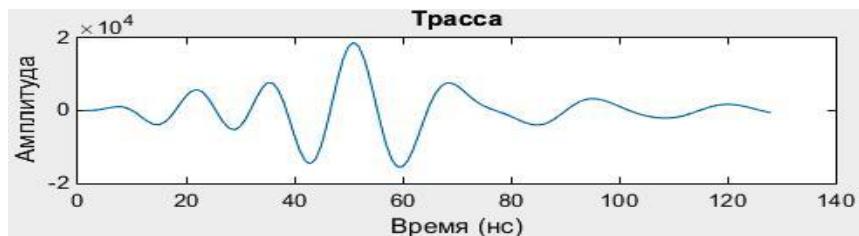


Рисунок 3.13 – График фильтрованной трассы радарограммы

Результат программы - весь набор трасс, составляющих радарограмму, каждая из которых подвергнута вышеописанной процедуре.

Эта процедура производится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном сигнала.

Выполняется процедура следующим образом: в системе или программе обработки имеется набор фильтров со своими параметрами, из которых конкретный вид фильтра выбирается пользователем, затем трасса подвергается прямому преобразованию Фурье, полученный комплексный спектр трассы умножается на комплексный спектр фильтра, и результат подвергается обратному преобразованию Фурье.

Параметрами процедуры фильтрации являются вид фильтра например, полосовой Баттерворт. Все параметры задаются пользователем в соответствии с инструкцией к соответствующей системе или программе обработки.

Вывод: Выбор способа борьбы с шумами должен производится с учетом свойств и особенностей информативного сигнала и помехи. Чем в большей степени свойства сигнала и шума априори известны, тем может быть получен больший эффект от цифровой обработки. Кроме того, несмотря на обилие стандартных, доведенных до уровня готовых программ цифровой обработки, с учетом конкретных априори известных свойствах информативного сигнала и шума разработка алгоритмов и собственного программного обеспечения для борьбы с шумами, является востребованной. Результаты работ по данному подразделу можно ознакомиться в работе [9].

3.3 Обработка радарограммы вейвлет преобразованиями.

В подразделе рассматривается применение дискретного вейвлет преобразования для очистки зашумленных сигналов трассы георадара.

Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала [1]. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов.

Дискретное вейвлет-преобразование может использоваться для простого и быстрого удаления шума с зашумлённого сигнала. Если оставить только ограниченное число наиболее высоких коэффициентов спектра дискретного вейвлет-преобразования, и проведём обратное вейвлет-преобразование мы можем получить сигнал очищенный от шума.

Объектом исследования является медный кабель закопанная на глубине 122 см. Результатом георадиолокационного обследования является набор одиночных трасс (сигналов), зарегистрированных

приемной антенной при каждом положении георадара. Радарограмма сканирования кабеля получена георадаром Лоза, см. Рисунок 3.14. Трасса этой радарограммы обработана пакетом Wavelet Toolbox системы численно-математического моделирования MatLab [10].

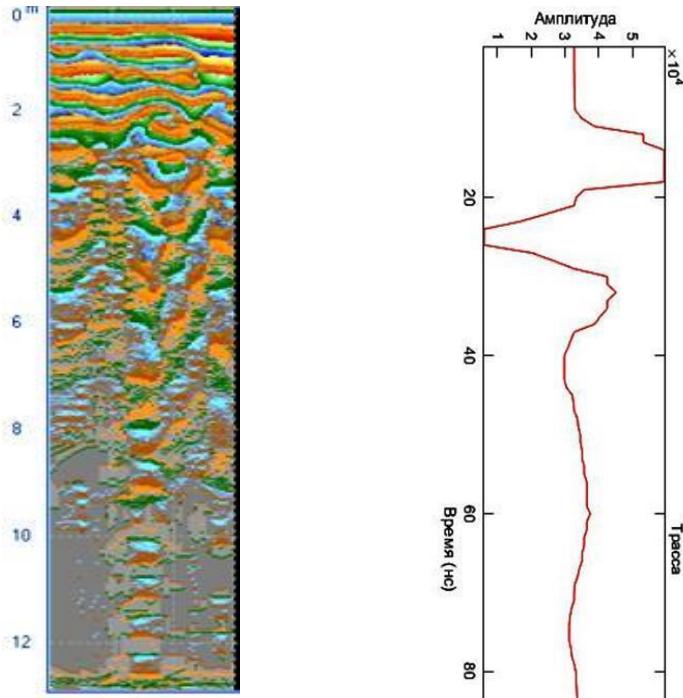


Рисунок 3.14 – Радарограмма и график трассы радарограммы

Дискретное вейвлет преобразование сигнала

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций

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

сконструированных из материнского (порождающего) вейвлета $\psi(t)$, за счет операций сдвига во времени – b и изменения временного масштаба – a . При исследовании сигнал представляется в виде совокупности последовательных приближений грубой (аппроксимирующей) $A_j(t)$ и уточненной (детализирующей) $D_j(t)$ составляющих:

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

с последующим их уточнением итерационным методом. Каждый шаг уточнения соответствует определенному масштабу, то есть уровню j анализа (декомпозиции) и синтеза (реконструкции) сигнала. Такое представление каждой составляющей сигнала вейвлетами можно рассматривать как во временной, так и в частотной областях. В кратномасштабном анализе сигнал $f(t)$ разлагается на две составляющие:

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

Базисные функции $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ однозначно определяются коэффициентами h_l :

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

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

При переходе от текущего масштаба j к следующему $j+1$ число вейвлет-коэффициентов уменьшается в два раза, и они определяются по рекуррентным соотношениям:

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

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

где

$$g_l = (-1)^l h_{2n-l-1}$$

При восстановлении (реконструкции) сигнала по его вейвлет-коэффициентам процесс идет от крупных масштабов к мелким и на каждом шаге описывается выражением:

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

Обработка трассы вейвлетами Хаара

Возможно многократное применение вейвлет-обработки георадиолокационного сигнала, что приводит к увеличению детализации исходного сигнала вплоть до частоты самого вейвлета. На практике избыточная детализация делает сигнал менее наглядным.

Для большинства георадиолокационных сигналов достаточно 5 повторений вейвлет-обработки для повышения разрешающей способности сигнала без потери, огибающей импульса.

Результаты преобразования трассы вейвлетами Хаара представлены на рисунке 3.15.

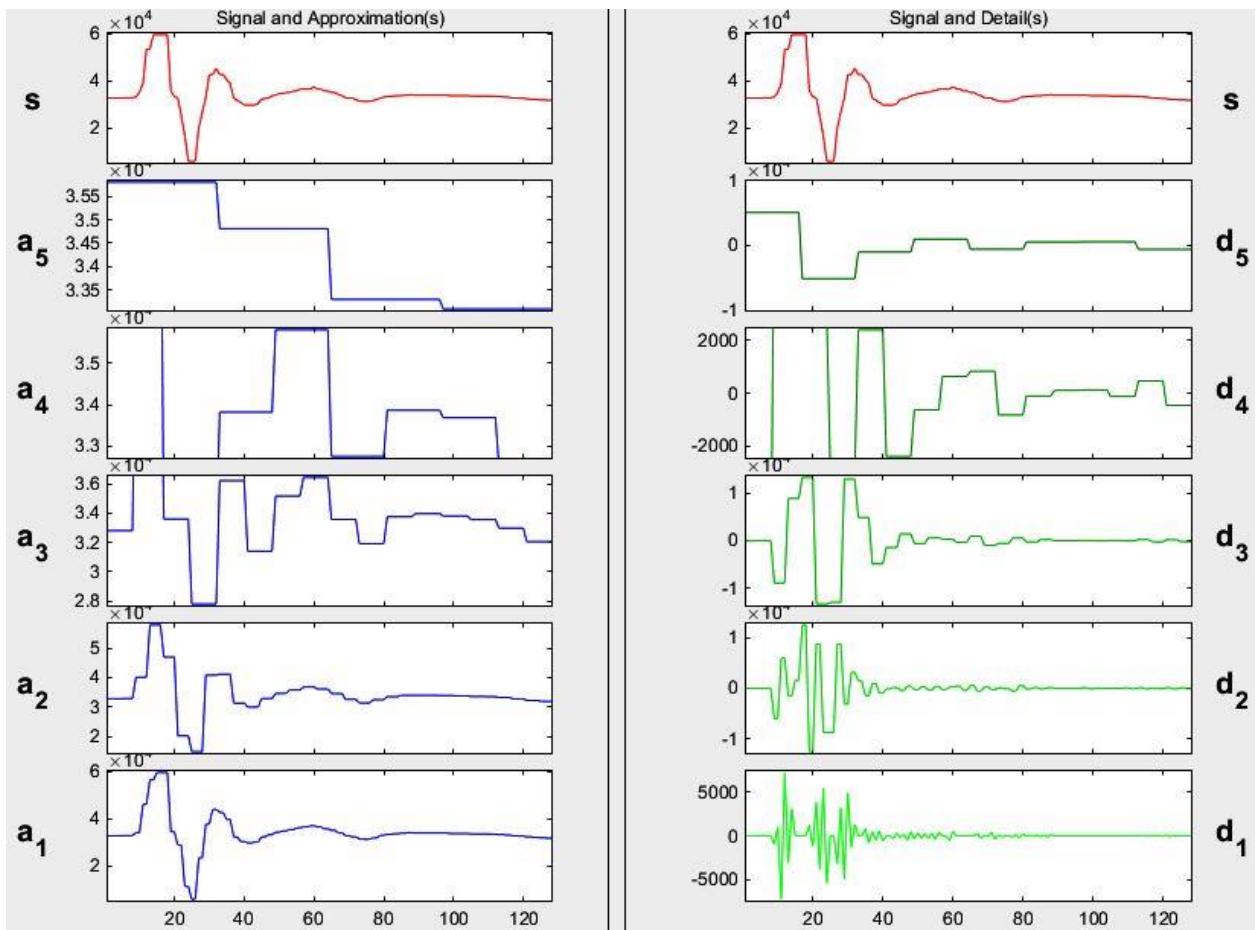


Рисунок 3.15 – Результаты обработки трассы вейвлетами Хаара

Дискретное вейвлет-преобразование может использоваться для простого и быстрого удаления шума с зашумлённого сигнала. Если оставить только ограниченное число наиболее высоких коэффициентов спектра дискретного вейвлет-преобразования, и проведём обратное вейвлет-преобразование (с тем же базисом) мы можем получить сигнал очищенный от шума (рисунок 3.16).

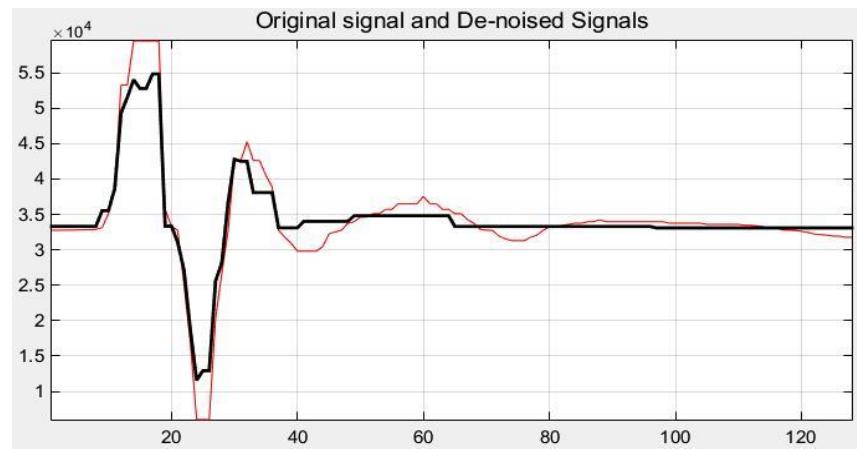


Рисунок 3.16 – Трасса очищенная вейвлетами Хаара

Обработка трассы вейвлетами Добеши

Вейвлеты Добеши не имеют аналитического выражения и определяются только фильтрами. В практических приложениях используются детализирующие h_k и аппроксимирующие g_k вейвлет-коэффициенты, без вычисления конкретной формы вейвлетов [11-12].

Результаты преобразования и очищения трассы вейвлетами Добеши представлены на рисунках 3.17, 3.18.

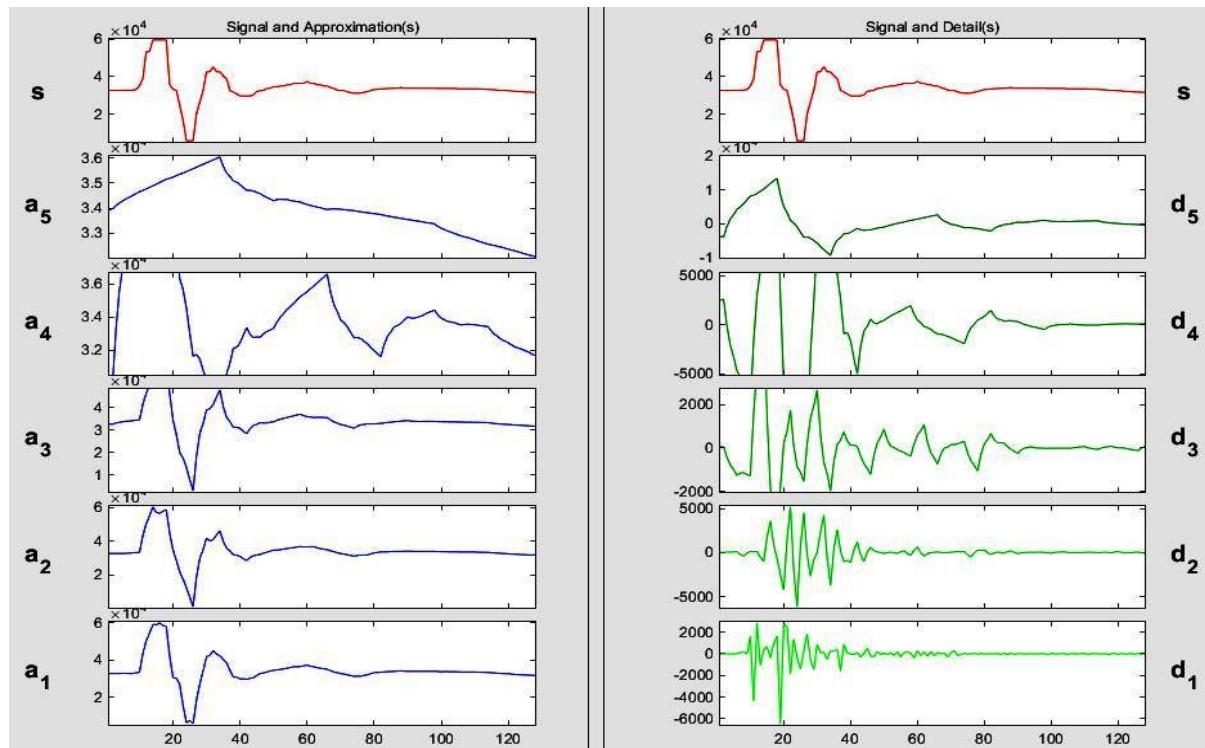


Рисунок 3.17 – Результаты обработки трассы вейвлетами Добеши

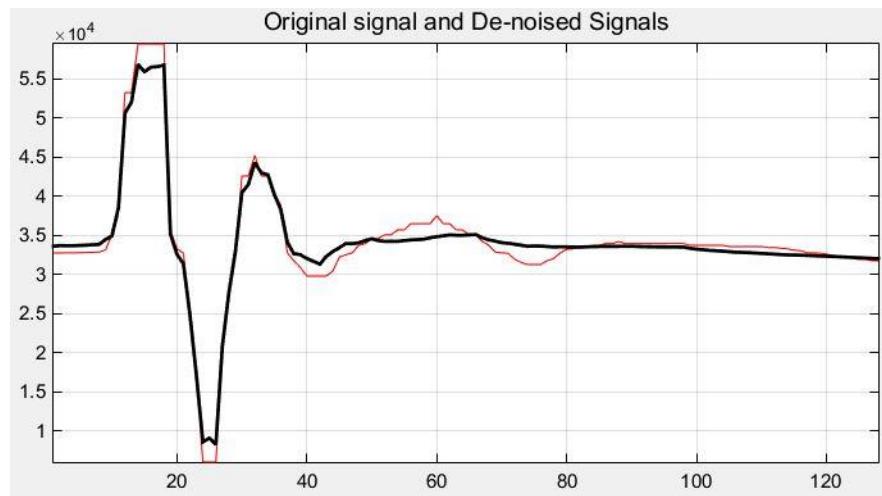


Рисунок 3.18 – Трасса очищенная вейвлетами Добеши

Выводы:

1. На основании проведенного анализа существующих подходов к очищению сигналов георадара качестве математического аппарата выбрано кратномасштабный вейвлет-анализ, применение которого позволяет выделить и сохранить локальные особенности сигналов георадара.
2. Материнский вейвлет для радарограммы должен обладать свойством ортогональности и возможностью реконструкции сигнала. В работе использовались: вейвлет Хаара и вейвлеты Добеши 4 - порядка.
3. Разработаны программы в среде MatLab, реализующие очистку сигнала от шума с использованием вейвлет-преобразования.
4. Проведенные исследования показали, что наилучший результат дает вейвлеты Добеши 4 - порядка.

Листинг разработанных программ представлен в приложении Е и Ж.

Результаты работ по первому разделу опубликованы в научном издании и материалах международной научной конференции [12-14].

Список использованных источников к Разделу 3:

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию: учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
2. Искаков К.Т., Боранбаев С.А., Азиева Н., Туарова М., Математическая модель по обработке сигналов источника и приемника. Труды IV международной научно-практической конференции "Информатика и прикладная математика", посвященной

70-летнему юбилею профессоров Биярова Т.Н., Вальдемара Вуйцика и 60-летию профессора Амиргалиева Е.Н. 25-29 сентябрь 2019, Алматы, Казахстан. с.456-468.

3. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. – М.: РИЦ "Техносфера", 2012. - 1048с.

4. Вопросы подповерхностной радиолокации: Коллективная монография / Под ред. А. Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.

5. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы). – М.: Издательство МГУ, 2007. – 54 с.

6. Айфичер Э. Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.

7. Воробьев С. Н. Цифровая обработка сигналов. М.: Академия, 2013. 320 с.

8. Владов М. Л., Золотарёв В. П. Старовойтов А. В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований / Москва, 1997.

9. Боранбаев С.А., Оралбекова Ж.О., Ұзакқызы Н., Турарова М.К. Обработка радарограммы цифровыми фильтрами Баттерворт // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – №4. – Астана, 2017, - С. 63-67.

10. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.

11. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. – 464с.

12. Боранбаев С.А., Оралбекова Ж.О., Хасенова З.Т. Вейвлет анализ трассы радарограммы // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – 2016. – №4 (113). – С.71–75.

13. Исқаков К.Т., Кусаинова А.Т. Научно-технические основы систем георадиолакации // Материалы международной научной конференции «Информатика и прикладная математика», посвященной 25-летию Независимости Республики Казахстан и 25-летию Института информационных и вычислительных технологий. 21–24 сентября 2016. – г. Алматы 2016. – С. 269–275.

4 АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТНЫХ ЗАДАЧ

В первой части раздела предлагается алгоритм для интерпретации данных георадара по определению диэлектрической проницаемости и проводимости среды [1]. С этой целью решены две практические

обратные задачи. В начале определены параметры источника, генерируемого георадаром. По известному источнику, найдены относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость среды. Задачи решаются на известных средах, которые специально были подготовлены на полигоне. Для первой задачи создана однородная среда, для второй локальная неоднородность, расположенная в горизонтально-слоистой однородной среде. Во второй части данного раздела описан программный модуль определения глубины залегания и проводимости подповерхностных объектов. Для определения глубины залегания подповерхностных объектов разработан программный модуль на языке C++ [2]. В программе в интерактивном режиме подбирается вид и размеры гиперболы и рассчитывается глубина залегания объекта, и проводимость сред.

4.1 Алгоритмы по определению геоэлектрического разреза слоистых сред.

В данном подразделе приводится алгоритм для интерпретации данных георадара по определению диэлектрической проницаемости и проводимости среды. Необходимо определить параметры источника, генерируемого георадаром. По известному источнику, будут найдены относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость среды. Для первой задачи выбран участок песчаного карьера - однородная среда, для второй подготовлена слоистая однородная среда: песок – слой торфа – песок.

Первый алгоритм решения прямой задачи – метод послойного пересчета, пригодный для численной реализации, был предложен в работе [3], который затем был усовершенствован в работах [4]. Далее алгоритм был развит в работах [5]-[8]. Суть метода заключалась в сведении дифференциального уравнения второго порядка к уравнению Риккати.

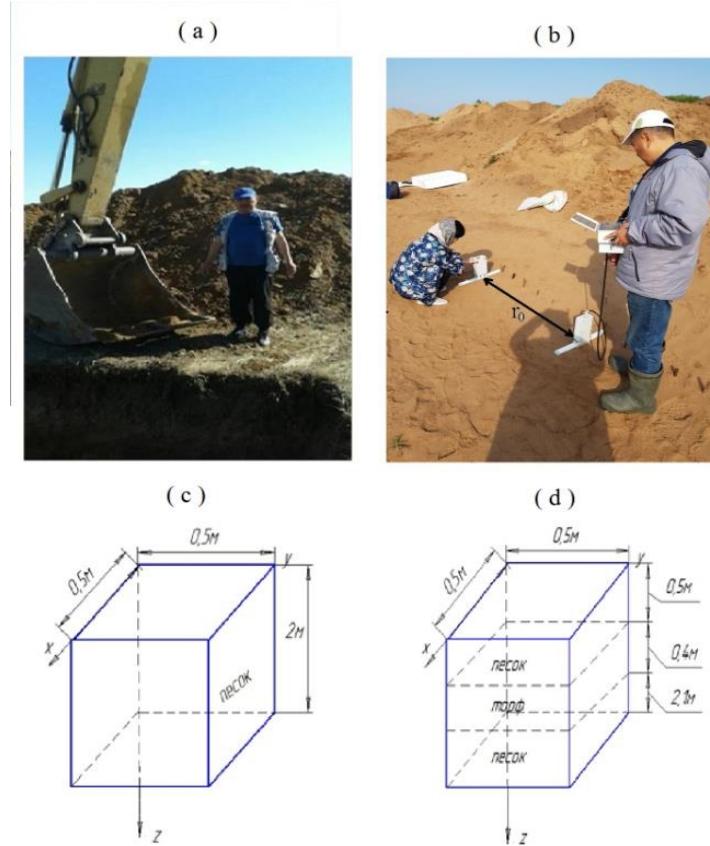


Рисунок 4.1 – а) Подготовка полигона, б) георадар “Loza-B”, в) модель однородной среды, г) модель горизонтально-слоистой среды

Считаем, что источник георадара, имеет вид:

$$(0,1)^T \frac{1}{r} \delta(r) \delta(z - z_*) g(t), \quad (4.1)$$

здесь, $g(t)$ - функция, описывающая действие источника в зависимости от времени t . Приемник находится в точке (r_0, z_*) , r_0 – известное расстояние, заданное конструкцией георадара (Рисунок 4.1 б)). Георадар имеет несколько фиксированных несущих частот f_0 , на которых производятся измерения, поэтому интерпретацию данных проводим в частотной области. Для превой обратной задачи подготовлен специальный участок (см. Рисунок 4.1 а) и в)). Используя функцию $g(t)$, решим вторую обратную задачу – определение диэлектрической проницаемости и проводимости горизонтально-слоистой среды, для которой подготовлен полигоне (см. Рисунок 4.1 а) и г)).

Алгоритм решения прямой задачи в частотной области

Рассмотрим среду $-N$ - слойную структуру с границами раздела z_n ($n = \overline{0, N}$), $z_0 = 0$; m -ый слой интервал $[z_{m-1}, z_m]$, последний $N+1$

(подстилающий) слой полупространство $[z_N, \infty)$, (см. Рис. 4.2), воздух полупространство $(-\infty, 0]$.

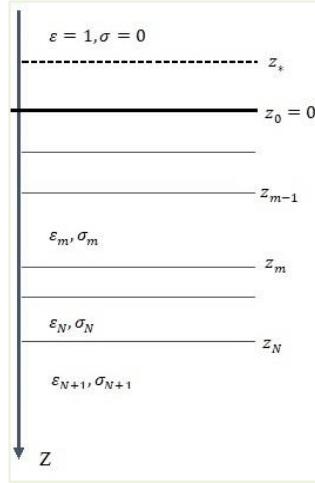


Рисунок 4.2 - Модель горизонтально-слоистой среды

Электромагнитные свойства каждого слоя характеризуются значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon_0 \epsilon$, проводимости и магнитной проницаемости $\mu_0 \mu$. Известно, что $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m and $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, и для достаточно широкого круга сред значение ϵ изменяется в интервале [1;80] и $\mu=1$, поэтому будем считать, что магнитная проницаемость является известной постоянной. Поскольку среда является горизонтально-слоистой, то, ϵ , σ являются кусочно-постоянными функциями переменной z ($z \in (-\infty, \infty)$).

Следуя работе [9], получим основные формулы для решения прямой задачи в частотной области.

Рассмотрим функцию, измеряемую георадаром, которая подчиняется следующему дифференциальному уравнению:

$$\epsilon U_{tt} + \sigma U_t = \frac{1}{\mu} (U_{rr} + \frac{1}{r} U_r + U_{zz}) + \frac{1}{r} \delta(r) \delta(z - z_*) g(t). \quad (4.2)$$

Начальные условия:

$$U|_{t=0} = 0, \quad U_t|_{t=0} = 0. \quad (4.3)$$

Условия склейки на границах раздела слоёв:

$$[U]_{z=z_n} = 0, \quad [U_z]_{z=z_n} = 0, \quad n = \overline{0, N}. \quad (4.4)$$

После преобразования Лапласа по времени t преобразования Фурье-Бесселя по пространственной переменной r , из (4.2)-(4.4) придем к следующей постановке:

$$u_{zz} - (\nu^2 + p^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon + p \mu_0 \sigma) u + \mu_0 \delta(z - z_*) \hat{g}(p) = 0, \quad (4.5)$$

$$[u]_{z_n} = 0, \quad [u_z]_{z_n} = 0, \quad k = \overline{0, N}, \quad (4.6)$$

Здесь, ν и p - параметры соответствующих преобразований. Необходимо добавить условие затухания на бесконечности:

$$u \rightarrow 0 (z \rightarrow \pm\infty). \quad (4.7)$$

Влияние источника можно убрать в склейку [9], тогда постановка задачи (4.5)-(4.7) будет эквивалентна следующей постановке:

$$u_{zz} - (\nu^2 + p^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon + p \mu_0 \sigma) u = 0, \quad (4.8)$$

$$[u]_{z_n} = 0, \quad [u_z]_{z_n} = 0, \quad n = \overline{0, N}, \quad (4.9)$$

$$[u]_{z_*} = 0, \quad [u_z]_{z_*} = -\hat{g}(p) \mu_0, \quad (4.10)$$

$$u \rightarrow 0 (z \rightarrow \pm\infty). \quad (4.11)$$

Для поиска значения $u|_{z=0}$ из решения задачи (4.8)-(4.11) применим метод послойного пересчета (см., например, [9]). Введём функцию s при помощи следующего соотношения:

$$u_z(z) = s(z)u(z), \quad (4.12)$$

которая будет удовлетворять дифференциальному уравнению Риккати

$$s' + s^2 = k^2, \quad k^2 = \nu^2 + p^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon + p \mu_0 \sigma, \quad (4.13)$$

в каждом слое $[z_{k-1}, z_k]$. Благодаря условиям (4.9) для функции s место условия склейки:

$$[s]_{z_n} = 0, \quad n = \overline{0, N}. \quad (4.14)$$

Легко видно (из (4.11)), что решение уравнения (4.13) в полуплоскости $(-\infty, z_*]$ (воздух) является постоянным

$$s(z) = k_0, \quad k_0 = \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon}.$$

Решение уравнения (4.13) в подстилающем слое $[z_N, \infty)$

$$s(z) = -k_{N+1}.$$

Решение уравнения (4.13) на интервале $[z_{m-1}, z_m]$ даётся формулой

$$s(z) = k_m \frac{(s^m + k_m) e^{2k_m(z - z_m)} + (s^m - k_m)}{(s^m + k_m) e^{2k_m(z - z_m)} - (s^m - k_m)},$$

где $k_m = \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \epsilon_m \epsilon + p \mu_0 \sigma_m}$, ϵ_m и σ_m – относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость в m -ом слое.

Благодаря условиям склейки (4.14) можно устроить рекуррентный пересчёт:

$$s^N = -k_{N+1}, \quad (4.15)$$

$$s^{m-1} = k_m \frac{(s^m + k_m)e^{-2k_m(z_m - z_{m-1})} + (s^m - k_m)}{(s^m + k_m)e^{-2k_m(z_m - z_{m-1})} - (s^m - k_m)}, \quad m = \overline{N, 1}, \quad (4.16)$$

$$s^* = k_0 \frac{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z^*} + (s^0 - k_0)}{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z^*} - (s^0 - k_0)}. \quad (4.17)$$

Условия склейки (4.10) в точке $z = z_*$ позволяют определить

$$u|_{z=z_*} \equiv u^* = \frac{\hat{g}(p)\mu_0}{s^* - k_0}.$$

Интегрируя уравнение (4.12) на интервале $[z_*, 0]$, получим

$$u|_{z=0} = u|_{z=z_*} \frac{2k_0 e^{k_0 z_*}}{(s^0 + k_0)e^{2k_0 z_*} - (s^0 - k_0)}.$$

Поскольку z_* весьма мало, в данном выражении можно перейти к пределу при $z_* \rightarrow 0$. Окончательно получим:

$$u|_{z=0} = \frac{\hat{g}(p)\mu_0}{s^0 - k_0}.$$

Для получения значения $u|_{z=0}$ для однородной среды положим $\varepsilon_m = \varepsilon$ и $\sigma_m = \sigma$ для всех $m = \overline{1, N+1}$, тогда $s^0 = -\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon + p \mu_0 \sigma}$. В этом случае получим:

$$u|_{z=0} = -\frac{\hat{g}(p)\mu_0}{\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon + p \mu_0 \sigma} + \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}}.$$

Применяя обратное преобразование Фурье-Бесселя, получим соотношение

$$\hat{U}(r_0, 0, \omega) = \int_0^\infty u(0, \nu, p) \nu J_0(\nu r_0) d\nu.$$

Обратная задача по определению источника.

Считаем, что модель среды – “воздух - однородная среда” (см. Рисунок 4.1 с)).

Временную функцию источника $g(t)$ можно определить с помощью следующего равенства:

$$\begin{aligned} \hat{U}(r_0, 0, \omega) &= -A(p, r_0) \hat{g}(\omega) \mu_0, \\ A(p, r_0) &= \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon + p \mu_0 \sigma} + \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}} d\nu, \end{aligned} \quad (4.18)$$

здесь, $\hat{U}(r_0, 0, \omega)$ – образ Лапласа измеренных радарограмм, $U(r_0, 0, t)$, $\hat{g}(\omega)$ – образ Лапласа функции источника, $p = \alpha + i\omega$ – параметр

преобразования Лапласа, ω – круговая времененная частота ($\omega = 2\pi f$, f – времененная частота).

Источник ищем в виде

$$g(t) = ae^{-bt} \cos(\omega_0 t - \varphi), \quad (4.19)$$

где постоянные a , b и φ подлежат определению, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – несущая частота георадара. Образ Лапласа функции $g(t)$ имеет вид

$$\hat{g}(p) = a \frac{(p-b) \cos \varphi + \omega_0 \sin \varphi}{(p-b)^2 + \omega_0^2}$$

Задача определения неизвестных постоянных решаем методом наименьших квадратов (см., например, [10]), минимизируя функционал невязки:

$$\Phi[a, b, \varphi] = \sum_{\omega_k} |\hat{U}_0(p) - A(p, r_0) \hat{g}(p) \mu_0|^2, \quad p = \alpha + i\omega_k, \quad (4.20)$$

где $\hat{U}_0(p)$ – образ Лапласа наблюденной радарограммы, значения частот ω брались из ограниченного интервала $[\underline{\omega}, \bar{\omega}]$. Для минимизации функционала (4.20) используем метод сопряженных градиентов (см., например, [11]).

Интеграл $A(p, r_0)$ (4.19) может быть вычислен, следующим образом.

Представим $A(p, r_0)$ в следующем виде:

$$\begin{aligned} A(p, r_0) &= A_1(p, r_0) + A_2(p, r_0) \\ &\equiv \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0) d\nu}{\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}} \\ &+ \int_0^\infty \left[\frac{\nu J_0(\nu r_0)}{\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0} \varepsilon + p \mu_0 \sigma} + \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{2\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}} \right] d\nu, \end{aligned}$$

Нетрудно видеть, что

$$\begin{aligned} A_2(p, r_0) &= -\frac{1}{2} (p^2 \mu_0 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) + p \mu_0 \sigma) A_3(p, r_0), \\ A_3(p, r_0) &= \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0) d\nu}{(\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0} \varepsilon + p \mu_0 \sigma + \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0})^2 \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}}, \end{aligned}$$

Поступая аналогично, получим

$$\begin{aligned}
A_3(p, r_0) &= A_4(p, r_0) - (p^2 \mu_0 \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) + p \mu_0 \sigma) A_5(p, r_0), \\
A_4(p, r_0) &= \frac{1}{4} \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0) d\nu}{(\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0)^{3/2}} \\
A_5(p, r_0) &= \int_0^\infty \frac{(\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon} + p \mu_0 \sigma) + 3\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0} \nu J_0(\nu r_0) d\nu}{(\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon} + p \mu_0 \sigma + \sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0})^3 (\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0)^{3/2}},
\end{aligned}$$

Известно [12]

$$A_1(p, r_0) = \frac{1}{2r_0} e^{-r_0 p \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}, \quad A_4(p, r_0) = \frac{1}{4p \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} e^{-r_0 p \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}.$$

Величина $A_5(p, r_0)$ может быть вычислена численно с хорошей точностью на конечном интервале интегрирования $[0, \nu_0]$, поскольку подынтегральное выражение на бесконечности убывает достаточно быстро, как $\nu^{-(4+1/2)}$.

Решение задачи минимизации функционала невязки (4.20) происходило на данных, полученных на специально подготовленной однородной среде (см. Рисунок 4.1 а) и с)). Была вырыта яма и заполнена сухим речным песком. Данные снимались с использованием источника (400 MHz) и приемника георадара “Loza-B” в течение 50 нс. Затем к данным было применено преобразование Лапласа с параметром $p = \alpha + i\omega$, $\alpha = 10^7$ 1/s, $\omega = 2\pi f$, $f = [350, 450]$ MHz. Результат решения задачи минимизации: $a = 1.5$ V/s, $b = 3 \times 10^9$ 1/s и $\varphi = 0.81$, график функции источника $g(t)$ (рисунок 4.3).

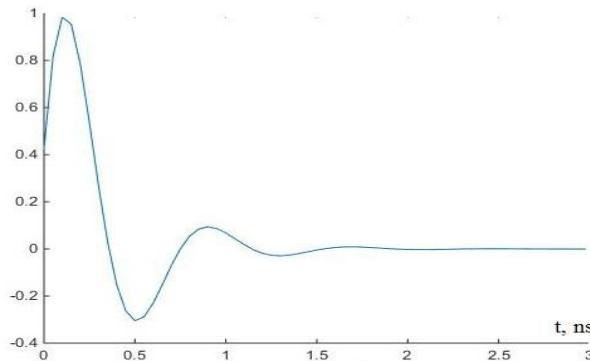


Рисунок 4.3 – Функция источника $g(t)$

Обратная задача по определению относительной диэлектрической проницаемости и проводимости горизонтально-слоистой среды.

Вычислим интеграл $B(p, r_0)$.

Воспользуемся тем, что значение величины s^0 сравнимо с величиной $-\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon + p \mu_0 \sigma}$, получим следующее представление:

$$B(p, r_0) = -\frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0) d\nu}{\sqrt{\nu^2 + p^2 \mu_0 \varepsilon_0}} + \frac{1}{2} \int_0^\infty \frac{s^0 + k_0}{(s^0 - k_0) k_0} \nu J_0(\nu r_0) d\nu,$$

откуда следует, что значение первого интеграла известно [12], а значение второго может быть вычислено на ограниченном отрезке $[0, \nu_1]$ с хорошей точностью, поскольку под интегральное выражение на бесконечности убывает достаточно быстро, как $\nu^{-(2+1/2)}$. Таким образом, получим

$$B(p, r_0) \approx -\frac{1}{2r_0} e^{-r_0 p \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} + \frac{1}{2} \int_0^{\nu_1} \frac{s^0 + k_0}{(s^0 - k_0) k_0} \nu J_0(\nu r_0) d\nu.$$

Откуда следует, что образ Лапласа радарограмм имеет вид

$$\hat{U}(r_0, 0, \omega) = B(p, r_0) \hat{g}(p) \mu_0, \quad B(p, r_0) = \int_0^\infty \frac{\nu J_0(\nu r_0)}{s^0 - k_0} d\nu,$$

Значение s^0 зависит от параметров преобразований ν и p .

Задача по определению диэлектрической проницаемости и проводимости слоёв решим при помощи минимизации функционала невязки:

$$\Phi[\varepsilon, \sigma] = \sum_{\omega_k} |\hat{U}_0(p) - B(p, r_0) \hat{g}(p) \mu_0|^2, \quad p = \alpha + i\omega_k, \quad (4.21)$$

где значения ω_k выбираются из ограниченного интервала $[\underline{\omega}, \bar{\omega}]$.

Для вычисления значений функционала невязки (4.20) для конкретных значений функций ε и σ , вычислим значения интеграла $B(p, r_0)$.

Для минимизации функционала (4.20) используем метод сопряженных градиентов [11]. Для вычисления градиента можно использовать алгоритм [13], либо её модификаций

Вычисление градиента функционала невязки (4.21)

Поскольку ε и σ являются кусочно-постоянными функциями и m -ый слой характеризуется постоянными значениями относительной диэлектрической проницаемости ε_m проводимости σ_m , тогда функционал невязки $\Phi[\varepsilon, \sigma]$ (4.21) можно рассматривать как функцию $\Phi[\dots, \varepsilon_m, \dots, \dots, \sigma_m, \dots]$. Тогда её градиент – это вектор

$$\nabla \Phi[\dots, \varepsilon_m, \dots, \dots, \sigma_m, \dots] = \left\langle \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon_m}, \dots, \dots, \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m}, \dots \right\rangle^T. \quad (4.22)$$

Для вычисления частных производных в (4.22) могут быть использована следующие выражения:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Phi}{\partial \varepsilon_m} &= \begin{cases} 0, & \text{if } \Phi(\dots, \varepsilon_m, \dots) \leq \Phi(\dots, \varepsilon_m + h_\varepsilon, \dots), \\ \frac{\Phi(\dots, \varepsilon_m + h_\varepsilon, \dots) - \Phi(\dots, \varepsilon_m - h_\varepsilon, \dots)}{2h_\varepsilon}, & \text{if } \Phi(\dots, \varepsilon_m, \dots) \geq \Phi(\dots, \varepsilon_m - h_\varepsilon, \dots), \\ \text{otherwise,} & \end{cases} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_m} &= \begin{cases} 0, & \text{if } \Phi(\dots, \sigma_m, \dots) \leq \Phi(\dots, \sigma_m + h_\sigma, \dots), \\ \frac{\Phi(\dots, \sigma_m + h_\sigma, \dots) - \Phi(\dots, \sigma_m - h_\sigma, \dots)}{2h_\sigma}, & \text{if } \Phi(\dots, \sigma_m, \dots) \geq \Phi(\dots, \sigma_m - h_\sigma, \dots), \\ \text{otherwise.} & \end{cases}\end{aligned}\quad (4.23)$$

Впервые формулы подобные (4.23) для вычисления градиента функционала невязки были использованы в работе [14]. Необходимость такой модификации была обусловлена тем, что использование только разностного выражения может привести к тому, что значение частной производной будет вычислено неправильно вплоть до знака. Неточное вычисление градиента приводит к тому, что теряется направление минимизации и продукируется “прыгающая” минимизационная последовательность, т.е. сначала значение функционала невязки убывает до некоторой величины, затем значение функционала резко увеличивается, после чего снова происходит уменьшение, затем снова резкое увеличение, и так далее. Использование формул подобных (4.23) позволило избежать таких ситуаций. Они были опробованы при численном решении различных обратных задач на симулированных и реальных данных (см., например, [7], [15]-[21], и во многих других работах). Ни в одном случае “прыгающая” минимизационная последовательность не была получена. Значения приращений h_ε или h_σ выбираются, решая обратную задачу на симулированных точных данных. Оптимальные значения приращений h_ε and h_σ выбираются из условия минимума итераций для поиска минимума функционала невязки.

Данные снимались с использованием источника (400 MHz) и приемника георадара “Loza-B” в течение 50 ns. Затем к данным было применено преобразование Лапласа с параметром $p = \alpha + i\omega$, $\alpha = 10^7$ 1/s, $\omega = 2\pi f$, $f = [350, 450]$ MHz.

Результаты восстановления приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты восстановления

	ε_e	ε	ε_L	σ_e	σ
1 слой (сухой песок)	3.6-4.2	3.7	3.8	0.002	0.0017
2 слой (торф)	55-65	54.0	60.0	0.048-0.052	0.0482
3 слой (сухой песок)	3.6-4.2	3.5	3.9	0.002	0.0022

В данной таблице введены обозначения: ε_e и σ_e – значения электромагнитных параметров среды, ε и σ – восстановленные по предлагаемому подходу значения параметров среды, ε_L – относительная диэлектрическая проницаемость среды, восстановленная по стандартной методике георадара “Loza-B”. Видно, что имеем хорошее соответствие результатов. Как видно из Таблица 4.2, восстановление диэлектрической проницаемости с помощью предлагаемого подхода и стандартного математического обеспечения георадара “Loza-B” даёт схожие результаты. Это позволяет осуществить следующий подход: сначала с помощью стандартного математического обеспечения георадара восстановить относительную диэлектрическую проницаемость слоистой среды, а затем, используя предлагаемый подход, восстановить проводимость. Результаты данного эксперимента приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты вычислений

	σ_e	σ
1 слой (сухой песок)	0.002	0.00194
2 слой (торф)	0.048-0.052	0.05021
3 слой (сухой песок)	0.002	0.00201

4.2 Алгоритм определения геофизических данных локальных объектов

В данном подразделе рассмотрены обратные задачи по определению вида источника и физических характеристик неоднородного включения, зависящего от пространственной переменной. Алгоритмы восстановления были апробированы на реальных данных, полученных с помощью георадара «Зонд-12».

Экспериментальные исследования проведены на полигоне с геологическим разрезом, содержащем идеально чистый песок и неоднородное включение «соляный купол» искусственного происхождения. Численный алгоритм позволяет определить

вторичный источник, возбуждаемый неоднородным включением и, впоследствии, определить диэлектрическую проницаемость этого включения. Отклик среды, полученный от георадара, был очищен от шума и помех при помощи алгоритмов фильтрации и вейвлетов. Табличное представление отклика среды использовалось как дополнительная информация для решения обратной задачи по определению геофизических свойств локализованного объекта.

Полученные результаты демонстрируют как адекватность математической модели, так и возможность практического применения рассматриваемого метода для интерпретации радарограмм.

4.2.1 Метод решения обратной задачи георадиолокации.

Потребность в решении обратных задач для гиперболических уравнений возникает из множества практических приложений, таких как сейсмология, георадилокация, медицина, теория электрических сетей и др. Математические вопросы существования, единственности решений, вопросы регуляризации и устойчивости рассмотрены во множестве работ (см., например, [22], [23]-[33]). Что касается численных подходов к коэффициентным гиперболическим обратным задачам, мы отсылаем читателя к монографиям [27]-[29].

Однако, несмотря на серьезные успехи в исследовании обратных задач для волновых процессов и широкое распространение георадаров, задачи интерпретации данных георадиолокации до сих пор не решены в полном объеме. Разработка методов интерпретации все еще остается востребованной в геофизических исследованиях. На практике обратные задачи, возникающие в методах георадиолокации решаются различными приближенными способами, наиболее важные из которых описаны в [34] и в обзоре [35]. В работе [36] был предложен новый метод решения обратной задачи георадилокации для одномерной среды, который мы впервые апробирован на реальных данных.

В настоящее время разработаны также экономичные методы решения прямых задач радиолокации для горизонтально-слоистых сред. Первый метод послойного пересчета был предложен в работе [3], который затем был усовершенствован в работе [4]. Далее алгоритм был развит в работах [5]-[7].

При георадиолокационном исследовании георадар регистрирует сигналы, полученные приемной антенной, как набор одиночных трасс,

которые затем объединяются в одно изображение — радарограмму [37]-[38]. Для решения инженерных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, а исходная радарограмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала от времени пробега. С другой стороны, необходимо очистить сигнал от различного рода шумов, скрывающих полезный сигнал. С этой целью нами для обработки радарограмм используются частотная фильтрация, усреднение сигналов и коррекция амплитуд [39], [40].

Целью георадарных исследований является определение электрических свойств среды. В рамках нашей модели, нам нужно восстановить функцию удельной диэлектрической проницаемости $\epsilon(z)$. Как показано в [36], знание функции источника $\Phi(t)$ — сигнала, поступающего в среду, позволяет на основе измерений напряженности поля на поверхности среды приближенно определить функцию $c(z)$. Далее, по распределению $c(z)$ вычисляется функция $\epsilon(z)$.

Сформулируем упрощенную математическую модель георадиолокации в волновом приближении [41]-[42]. Предположим, что среда заполняет полупространство $z > 0$ а полупространство $z < 0$ заполнено воздухом. Пусть электрическая проницаемость ϵ среды зависит только от координаты z , а магнитная проницаемость $\mu = \mu_0 = \text{const} > 0$ постоянна во всем пространстве. Будем считать, что проводимость среды пренебрежимо мала. Пусть источник тока с интенсивностью

$$\begin{aligned} j^{-ex}(t) &= \Phi(t)\delta(z), \Phi(t) = 0 \text{ если } t \leq 0 \\ \Phi(t) &\in C^2[0, \infty], \Phi''(+0) \neq 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

размещен на границе $z = 0$ и направлен вдоль оси y . Тогда, как следует из уравнений Максвелла [1], электромагнитное поле имеет только компоненту $E_y(z, t)$, которая зависит только от переменных (z, t) . Можно представить $E_y(z, t) = U(z, t) + u(z, t)$, где $U(z, t)$ есть поле над однородной средой с постоянными электрическими свойствами.

В работе [36] было показано, что задача георадиолокации в линейном приближении сводится к следующей обратной задаче: *Требуется найти функцию источника $F(z)$ в правой части волнового уравнения в начально-краевой задаче:*

$$\begin{cases} u_{tt} - c_1^2 u_{zz} = F(z)H\left(t - \frac{z}{c_1}\right), c_1 = \text{const} > 0, \\ (z, t) \in \Omega_T = \{(z, t) | z > 0, -\infty \leq t \leq T\}; \\ (u_t - c_0 u_z)_{z=0} = 0, c_0 = \text{const} > 0, u|_{t<0} = 0, \end{cases} \quad (4.25)$$

по граничным измерениям:

$$g(t) := u(0, t), t \in [0, T] \quad (4.26)$$

Функция $H(\cdot)$ в правой части определяется через интенсивность тока $\Phi(t)$, поступающего в среду от передающей антенны, по формуле

$$H(t) = \frac{\mu_0 c_0 c_1^3}{c_0 + c_1} \Phi''(t) \quad (4.27)$$

Здесь $c(z) = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon(z)}$ есть скорость распространения электромагнитных волн в среде в зависимости от глубины z , и

$$c^{-2}(z) = \begin{cases} c_0^{-2}, & \text{if } z < 0 \\ c_1^{-2} + F(z), & \text{if } z \geq 0, \end{cases} \quad (4.28)$$

функция $F(z)$ имеет финитный носитель в интервале $(0, c_1 T/2)$, а постоянные $c_0 > 0, c_1 > 0$, которые определяют скорость электромагнитной волны в воздухе и вмещающей среде известны. Это означает, что зондируемая среда электрически однородна, за исключением финитного слоя толщиной не более чем ($l = c_1 T/2$), в котором отклонение скорости волны от постоянного значения описывается функцией $F(z)$.

В [36] было показано, что регуляризованное решение обратной задачи (4.25)-(4.26) может быть получено в виде частичной суммы ряда Фурье

$$F^N(z) = \sqrt{\frac{2}{l} \sum_{k=1}^N F_k \sin \frac{k\pi z}{l}} \quad (4.29)$$

где коэффициенты Фурье вычисляются из решения системы линейных алгебраических уравнений

$$(A^N + \alpha I)F_\alpha^N = b^N \quad (4.30)$$

где α есть параметр регуляризации. Элементы матрицы A^N и вектора правых частей b^N заданы выражениями

$$\begin{aligned} A^N_{ij} &= \int_0^T G_i(t) G_j(t) dt, \quad i, j = \overline{1, N}, \\ b^N_j &= \int_0^T G_j(t) g(t) dt, \quad j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Здесь функции $G_k(t)$ определяются по формулам

$$G_k(t) = \frac{\mu_0 \sqrt{2}}{(c^{-1} + c_0^{-1})^2} \int_0^{ct/2} \sin \frac{k\pi z}{l} (\Phi'(t - 2\xi/c) - \Phi'(0)) d\xi, \quad k = \overline{1, N} \quad (4.32)$$

Для решения уравнений (4.30) необходимо знать зависимость от времени сигнала, поступающего в среду $\Phi(t)$ и $F(z)$. В [36] было показано, что функция источника $\Phi(t)$ связана с напряженностью поля на поверхности однородной среды по формуле:

$$U(0, t) = -\frac{\mu_0 c_0 c_1}{c_0 + c_1} \Phi(t) \quad (4.33)$$

Оказалось, как показано в [43], что функция $\Phi(t)$ может быть определена из полевых измерений, полученных при радиолокации над однородной средой. Отсюда следует, что функция $\Phi(t)$ задается таблично. Для избежания дифференцирования таблично заданной функции, соотношенире (4.32) преобразована к виду:

$$G_k(t) = \frac{\sqrt{2} k \pi \mu_0}{l^{3/2} (c^{-1} + c_0^{-1})^2} \int_0^t \cos \left(\frac{k \pi (t - \eta) c_1}{2l} \right) \Phi(\eta) d\eta \quad (4.34)$$

Формула (4.34) позволяет вычислять интегралы на основе дискретных значений $\Phi(t)$ по формулам численного интегрирования.

Функция $g(t)$, в формулах (4.31), согласно [36], представляет собой отклонение электрического поля на поверхности неоднородной среды от поля над однородной средой, в которой скорость волны c_1 постоянна. Поэтому данные $g(t)$ равны разности радарограмм, снятых над неоднородной средой и радарограмм, полученных над однородной средой.

Поскольку в радарограммах всегда присутствует шум, для использования данных зондирования необходимо выполнить предварительную обработку и очистку данных от шума.

4.2.2 Численные результаты

На рисунках 4.4-4.5 показаны примеры решения обратной задачи идентификации функции $F(z)$, полученные описанным в предыдущем разделе методом. В расчетах мы применяли формулы (4.34), вместо формулы (4.32), как это было в [36]. Были повторены расчеты из работы [35], но при этом функция $g(t)$ задавались таблично, включая шум на уровне $\gamma = 5\%$. Аддитивный шум определялся аналогично [36]:

$$g_\gamma(t) = g(t) + \gamma n(t) \|g(t)\| / \|n(t)\|$$

Здесь нормы таблично заданных функций $g(t_i), n(t_i)$ задавались как евклидовые нормы векторов. Значения шума $n(t_i)$ генерировались при

помощи генератора случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[-1,1]$. Как видно из результатов, метод дает удовлетворительные численные результаты на синтетических данных.

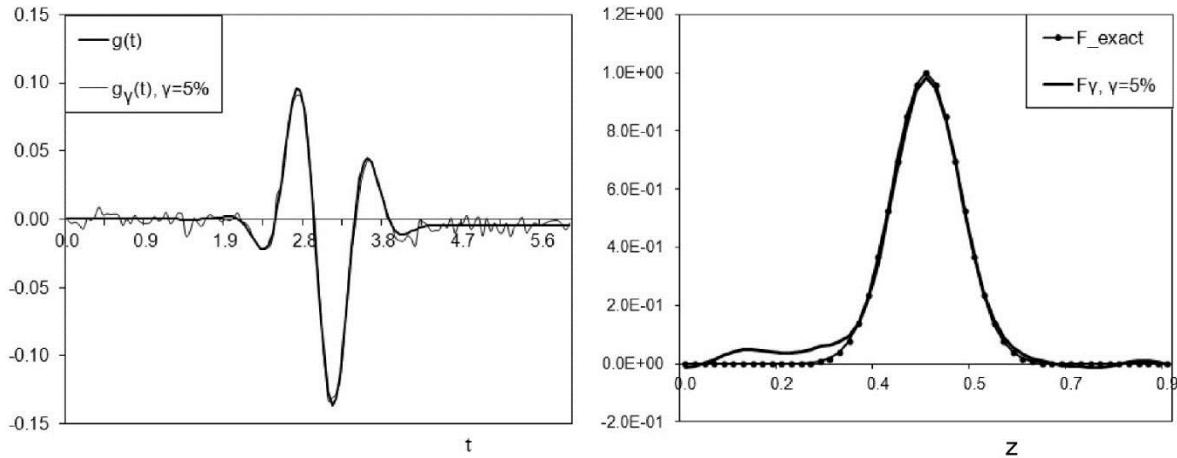


Рисунок 4.4 – Идентификация функции $F(z) = \exp(-(z - 0.45)/0.09)^2$ (правый) по 5% зашумлённым данным (левый) для $\Phi(t) = \sin(8t)\exp(-0.2t)$

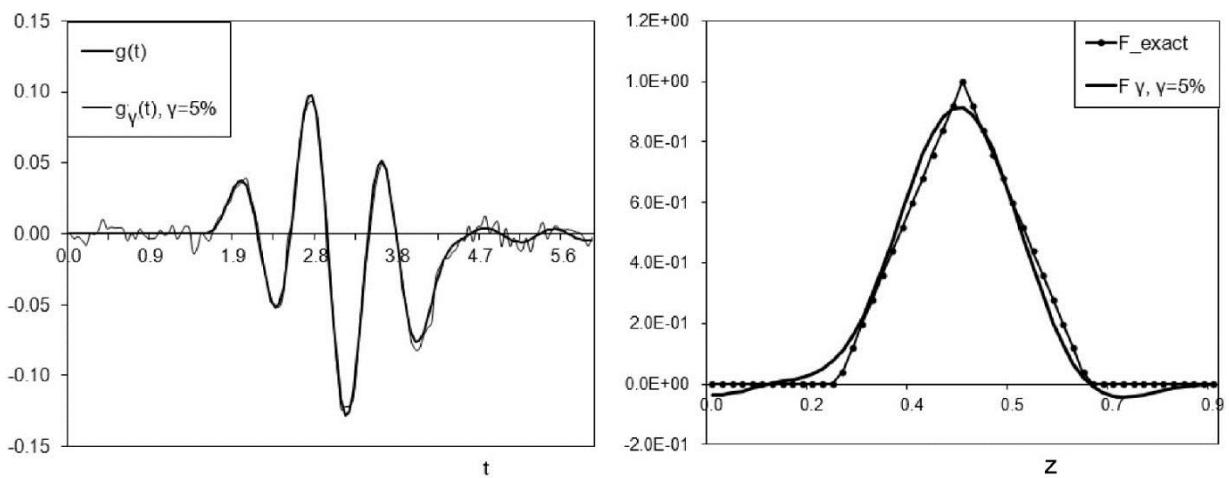


Рисунок 4.5 – Восстановление функции негладкой $F(z)$ по 5% зашумленным данным для $\Phi(t) = \sin(8t)\exp(-0.2t)$

В приведенных выше примерах расчета восстанавливалась функция $F(z)$, которая связана со скоростью распространения сигнала в среде $c(z)$ по формуле:

$$c(z) = \sqrt{\frac{1}{c_1^{-2} + F(z)}} = \sqrt{\frac{c_1^2}{1 + c_1^2 F(z)}} = \frac{c_1}{\sqrt{1 + c_1^2 F(z)}}, \quad (4.35)$$

которая легко получается из представления (4.28) для $z > 0$.

Для проверки работоспособности алгоритма на реальных данных, были проведены интерпретации сначала для радарограмм, взятых на однородной среде, затем для среды, содержащей соляный купол.

Теоретически, для однородной среды мы должны были бы получить распределение скорости, показанное на рисунке 4.6. Однако, в силу фактической неоднородности реальной среды, неточности моделирования, наличия шумов и т.д., мы получили график, показанный на рисунке 4.7. Т.е. имеются волнообразные отклонения от значения скорости 0.5 м/нсек с глубиной, как показано на рисунке 4.7. Тем не менее, результаты показывают удовлетворительное согласование с моделью.

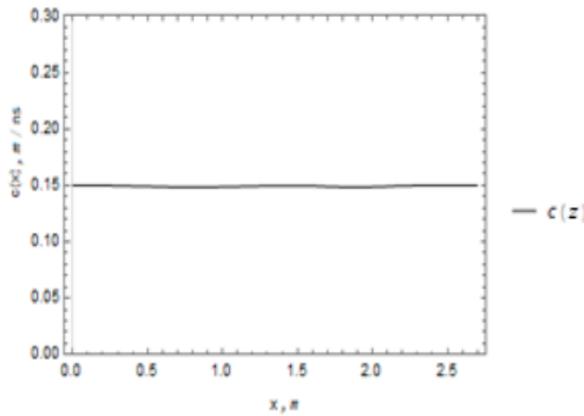


Рисунок 4.6 – Скорость распространения электромагнитных волн в песке для сигнала (радарограммы) построенного с помощью синтетических данных в модели

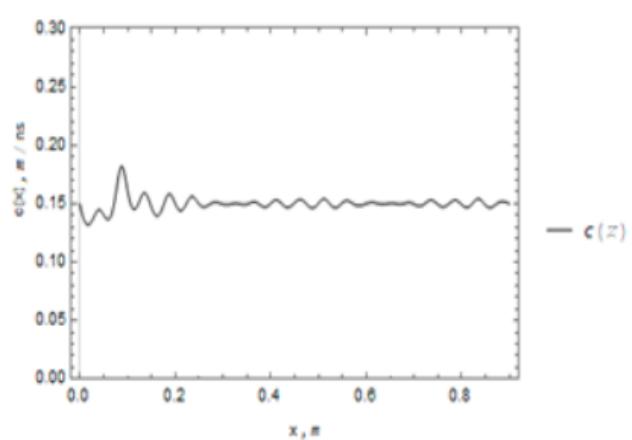


Рисунок 4.7 – Скорость распространения электромагнитных волн в песке, для реальных данных полученных от георадара

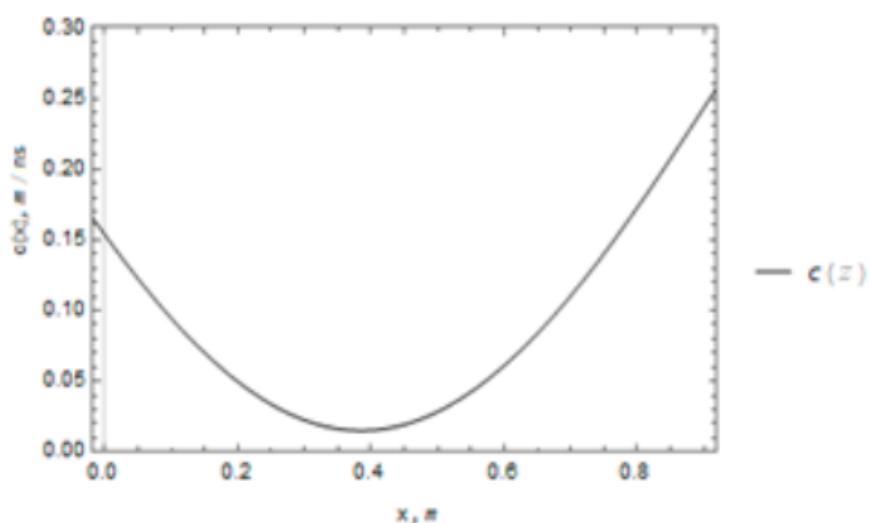


Рисунок 4.8 – Скорость распространения электромагнитных волн в соляном куполе, при реальных данных полученных от георадара

При зондировании над соляным куполом в реальности мы имеем дело с разрывным распределением относительной диэлектрической проницаемости и с неодномерной средой. Заметим, что метод [36] был разработан для сред, в которых диэлектрическая проницаемость слабо отклоняется от фоновой и является гладкой функцией от глубины z . Искомая функция, как в модельных расчетах [36], так и в расчетах на реальных данных, получается в виде конечной суммы ряда Фурье, поэтому мы получаем гладкое распределение $c(z)$. На Рис. 4.8 показаны результаты интерпретации согласно описанного выше метода. Как видно из Рис. 4.8, хотя распределение скорости сильно сглажено, но точка экстремума скорости совпадает с глубиной локальной неоднородности – 0,4 м.

4.2.3 Результаты экспериментальных исследований

На песчаном карьере ТОО «Нурсат», находящемся в 68 км от города Нур-Султан по Кургальджинской трассе, были проведены экспериментальные исследования для определения физических характеристик неоднородного включения, помещенного в однородную среду – чистый песок. В качестве неоднородного включения был создан объект «соляный купол».

В экспериментах использовался радарный комплекс «Зонд-12е» с антенной 300МГц, которая подходит для поставленных задач, как по размеру исследуемых объектов, так и по среде, в которой они находятся. Основная подготовка результатов исследования осуществлялась с помощью специализированной программы “Prism2”. Программный пакет “Prism2” предназначен для работы в полевых условиях в составе георадара “Zond-12e”, а также в лабораторных условиях при обработке и интерпретации данных радиолокационного зондирования.

Первым объектом исследования была модель ненарушенной среды с однородным строением, (см. Рис. 4.9). На Рис. 4.10 представлена обработанная радарограмма в программе “Prism2”, левая часть которой соответствует однородному ненарушенному строению толщи, что соответствует модели.



Рисунок 4.9 – Объект № 1
«Песчаный карьер»

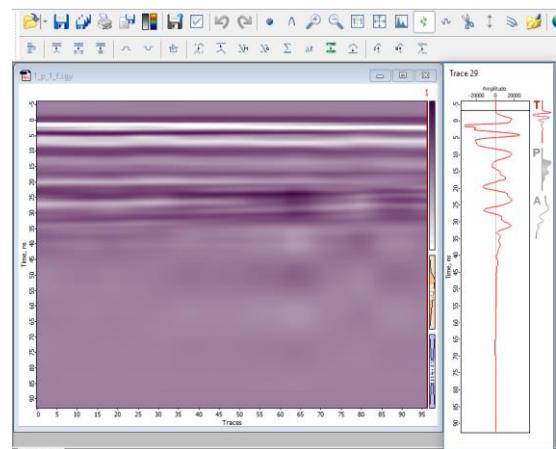


Рисунок 4.10 – Радарограмма
объекта №1 «Песчаный карьер».

Главным объектом исследования был «соляной купол», показанный на Рис. 4.11 в яме на глубине 0,6 м., расположен купол соли, конусообразной формы, с диаметром основания 0,43 м, высота купола 0,35 м. Для получения соляного купола мы постепенно заливали среду водой, чтобы сгладить форму, а затем покрыли песком. Были сделаны поперечные и продольные прохождения объекта георадарным комплексом Зонд 12е с антенной частотой в 300 МГц.

На следующем рисунке 4.12 показана радарограмма, обработанная в программе “Prism2”.



Рисунок 4.11 – Объект «Соляной
купол»

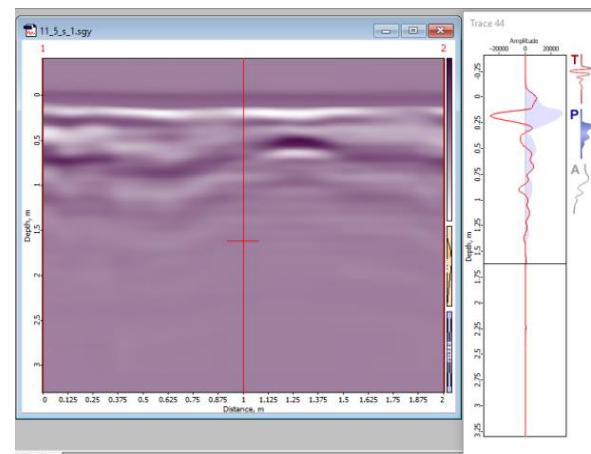


Рисунок 4.12 – Радарограмма
профиля на объекте №2 «Соляной
купол».

На радарограмме (Рис. 9) хорошо выделяется аномальный объект на глубине 0,35 м на пикетах 80-150 на секущем профиле. Эта глубина определялась на основе программного обеспечения радара. Реальная

глубина аномального объекта составляет 0,40 м. Таким образом можно утверждать, что удалось не только определить латеральное расположение аномального объекта, но и откартировать его геометрию по глубине.

Обработка экспериментальных данных георадара Зонд-12

Сигналы получены от георадара серий «Zond-12» выдаются в формате «sgy». Этот файл данных формата SEG-Y был создан программным обеспечением Prism 2.60.01 (Build 15.0409) радиолокационных систем. Для анализа и визуализации сигнала мы перешли от бинарного формата файла «sgy» в текстовый формат.

В интерфейсе Георадара Зонд12-е используются следующие функции: Выборка (Sample); Трасса (Trace); Профиль (Profile).

1. Выборка: дает единичное значение, содержащее амплитуду отраженного сигнала в определенный момент времени.

2. Трасса: есть совокупность выборок, содержащих одномерную информацию об отраженных сигналах. Пример трассы приведен на Рис 4.13.

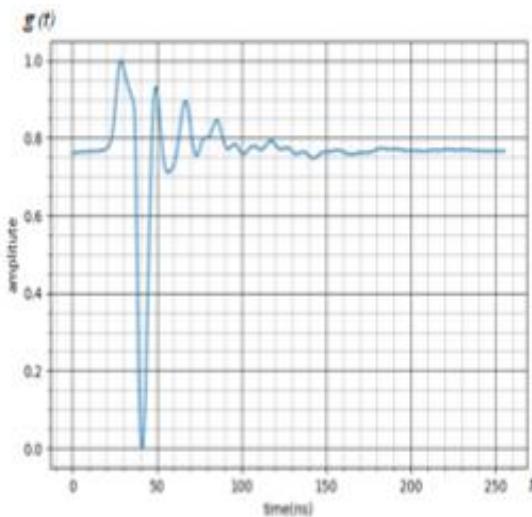


Рисунок 4.13 – Отображение трассы в программе Prism2

3. Профиль: совокупность трасс, содержащая двухмерную информацию об отраженных сигналах, полученных в результате прохождения какого-либо маршрута. Профиль может содержать любое количество трасс. Пример профиля в различных видах отображения приведен на Рис.4.14. Собственно профиль (или какое-то количество профилей) в виде файла (файлов) образуют конечный результат зондирования. Далее следует обработка, вывод на печать и интерпретация данных.

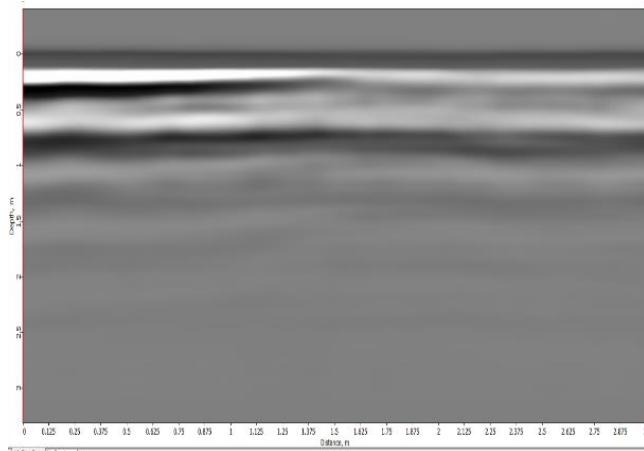


Рисунок 4.14 – Отображения плотностного профиля (Радарограмма одного из профилей на участке «Соляной купол»)

Полученные табличные значения содержат записанные положения маркеров и значения амплитуд в виде текстового файла. Чтобы визуализировать эти сигналы, был разработан алгоритм на языке программирования Python. Для создания графиков использована библиотека «Matplotlib».

При георадиолокационном исследовании прибор регистрирует сигналы, полученные приемной антенной, как набор одиночных трасс, затем представляет их в виде изображения — радарограммы [37]-[38]. Необходимо очистить сигнал от различного рода шумов, скрывающих полезный сигнал. С этой целью для обработки радарограмм нами была использована частотная фильтрация, усреднение сигналов и коррекция амплитуд [39]. Для очистки сигнала от шума использовались вейвлеты Добеши, с пирамидальным алгоритмом Малла вычисления вейвлет-коэффициентов [44], [45]. Программно-управляемая пороговая обработка детализирующих вейвлет-коэффициентов осуществлялась по критерию Штейна несмещенной оценки риска (Stein's unbiased risk estimation) [10]. Графики исходного сигнала и ее спектра представлены на Рис. 4.15, 4.17, и после очистки вейвлетами на Рис. 4.16, 4.18.

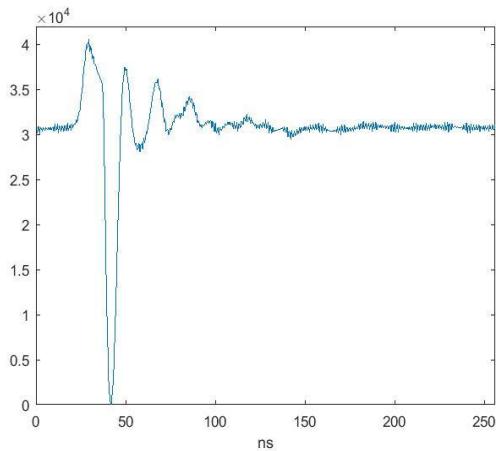


Рисунок 4.15 – График исходного сигнала (трасса радарограммы)

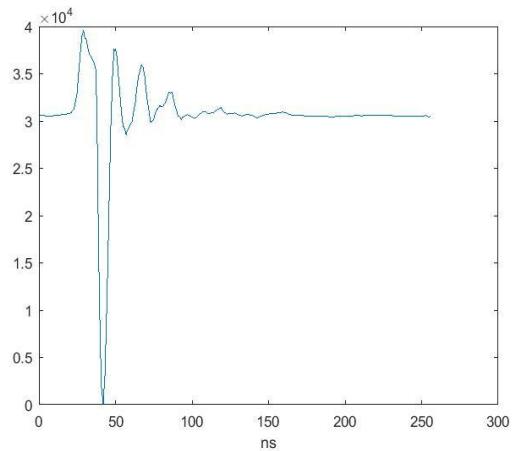


Рисунок 4.16 – График очищенного сигнала (вейвлет фильтр)

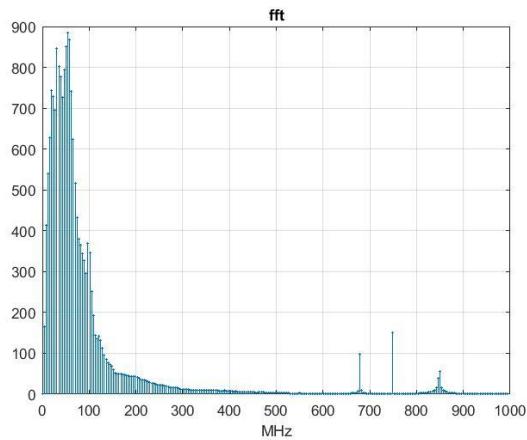


Рисунок 4.17 – Спектры исходного сигнала (трассы радарограммы)

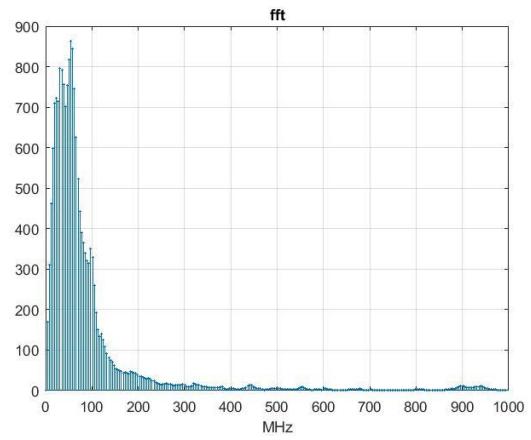


Рисунок 4.18 – Спектры очищенного сигнала (вейвлет очистка)

Обработка сигнала и ее спектра фильтрами Баттервортта, представлены на Рис. 4.19-4.22.

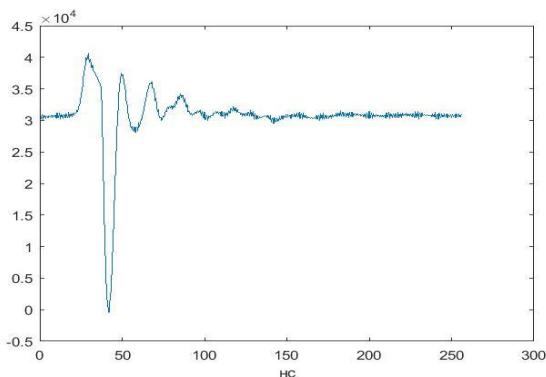


Рисунок 4.19 – График исходного сигнала (трасса радарограммы)

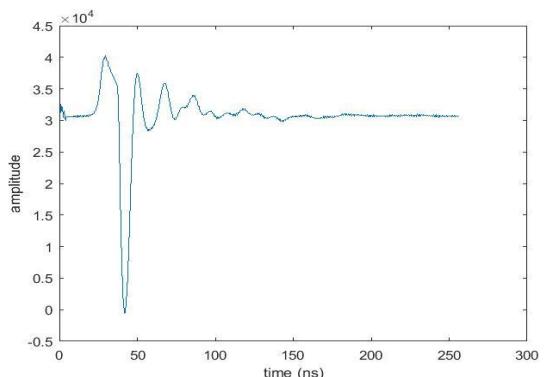


Рисунок 4.20 – График очищенного сигнала (фильтр Баттервортта)

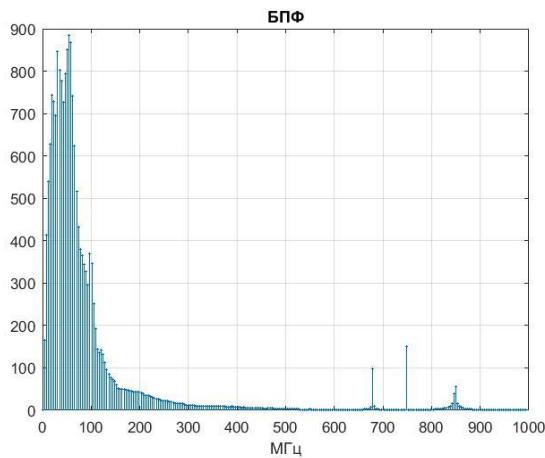


Рисунок 4.21 – Спектры исходного сигнала (трассы радарограммы)

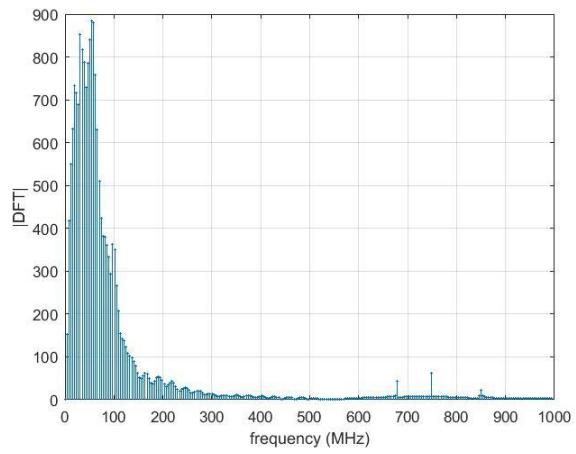


Рисунок 4.22 – Спектры очищенного сигнала (фильтр Баттервортса)

Выводы

Предложенный здесь метод интерпретации основывался на алгоритме решения линеаризованной обратной задачи из [36]. Метод был разработан для одномерных сред с гладким распределением диэлектрической проницаемости, слабо отклоняющейся от фона. Тем не менее, он оказался пригоден для приложения к реальным данным георадиолокации. На основе метода определения функции источника из работ [36], [43] и [44] были разработаны и апробированы на реальных данных численные алгоритмы по определению электрических свойств среды. Численные результаты показали хорошее соответствие точных и восстановленных данных. Предложенный подход может использоваться как для интерпретации радарограмм, полученных от георадаров.

В данном подразделе предложен алгоритм определения источника возбуждения электромагнитных волн, излучаемых георадиолокационным прибором, как функции времени. Математическая модель для решения этой задачи построена и апробирована на модельных данных. Нами построен алгоритм по построению функции источника на основе реальных данных георадара. С этой целью использованы результаты экспериментальных исследований, проведенных в полевых условиях с использованием георадара Лоза-В. Проведены эксперименты в среде: воздух-песок.

Полученный сигнал отклика среды, обработан от помех и шумов. С этой целью нами для обработки радарограмм используются частотная фильтрация, усреднение сигналов, коррекция амплитуд. В

дальнейшем полученная табличная форма сигнала возмущения будет использована нами для исследования неоднородных сред, в том числе и для исследование локализованных объектов. Приведены серии расчетов для рассматриваемых задач.

Результатом георадиолокационного обследования является набор одиночных трасс (сигналов), зарегистрированных приемной антенной при каждом положении георадара. Для решения инженерных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, тогда как исходная радарограмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала от времени отражения.

Как известно все радары, могут фиксировать, только время пробега до отражения от границ объектов или неоднородных сред. С другой стороны, это является функцией от времени или иначе называют дополнительной информацией (отклик среды). Эта функция является дополнительной информации для решения обратных задач, в нашем случае определения геологического разреза. Приведем ниже методику исследований одного из известных методов решения такого сорта задач.

Оптимизационный метод решения обратных задач электроразведки является одним из наиболее эффективных и широко применяемых на практике.

Основные идеи метода были предложены А. Н. Тихоновым, М. М. Лаврентьевым, В. К. Ивановым, Г. И. Марчуком, А. С. Алексеевым и многими их учениками, и последователями.

Широкий спектр обратных задач геоэлектрики и численные методы решения этих задач (в том числе оптимизационный метод) изложены в монографии В. Г. Романова, С. И. Кабанихина [46].

Для численного решения обратных задач геоэлектрики в слоистых и вертикально-неоднородных средах метод сопряженных градиентов применен в работе К. Т. Исакова, С. И. Кабанихина [47].

Цикл работ [48-51] посвящен экспериментальным и численным исследованиям решений прямой и обратной задачи нелинейной диффузии, связанных с процессом сушки пористых материалов. Эксперименты проведены коллективом авторов в лаборатории магнитных и спиновых явлений Международного томографического центра СО РАН и Института катализа СО РАН. Результаты экспериментальных и численных исследований опубликованы в работах [48, 49], а постановки задач и разработка алгоритмов в работах [50, 51].

В комплекс включается алгоритм расчета концентрации (прямая задача) в процессах сушки (адсорбции) различных пористых материалов (оксид алюминия, силикагель), содержащих жидкость (вода, ацетон и т. д.), адсорбции паров воды селективными сорбентами воды (силикагель или оксид алюминия, содержащие хлорид кальция).

Результаты численных расчетов решений прямой и обратной задач удовлетворительно согласуются с данными измерений, полученными экспериментально.

Вопросы условной устойчивости обратной задачи для уравнения гиперболического типа с постоянной Липшица, зависящей от глубины, от априорно заданной нормы неизвестного коэффициента и нормы данных обратной задачи в пространстве H_1 , отражены в работе [52].

Разработан и на модельных примерах апробирован метод Фурье коллокации для восстановления зависимой от пространственной переменной функции источника $F(x)$. Рассмотрена обратная задача идентификации источника, зависящего от пространственной переменной $F(x)$ в одномерном волновом уравнении. Показано взаимосвязь между этой задачей и задачей интерпретации данных георадара (GPR) [53,54]. Работы [55,56] посвящены к визуализации получаемых данных для последующей интерпретации и получению достоверной информации о подповерхностных геологических средах, естественных и искусственных неоднородностях, аномалиях, предметах. Приведены визуализация обработанных георадиолакационных данных и описание программы обработки сигналов георадара для интерпретации подповерхностных геологических сред.

В работах [57,58] приведен эффективный алгоритм (метод послойного пересчета) решения обратной задачи для уравнения геоэлектрики в частотной области по одновременному определению диэлектрической проницаемости и проводимости сред, а также определения границ разрыва сред.

Показана дифференцируемость функционала невязки с учетом границ раздела сред. С учетом этого обобщен известный алгоритм послойного пересчета. На основании критической частоты установлен диапазон, для которого могут быть определены две функции одновременно.

В работе [59] изучаются вопросы условной устойчивости решения обратной коэффициентной задачи для уравнения геоэлектрики. Для исследования устойчивости, исходная обратная задача сведена к

системе интегральных уравнений Вольтера второго рода. Введен класс корректности решений обратной задачи и класс входных данных. Получена оценка условной устойчивости решения обратной задачи от входных данных в норме пространстве H_1 .

В работе [60] исследован функционал невязки для численного решения обратной задачи для уравнений теории упругости. Модель среды – горизонтально-слоистая. Доказана дифференцируемость функционала невязки по координате точки разрыва среды для уравнений теории упругости. Получено явное аналитическое выражение для этой производной. Это позволяет градиентным методом определить координаты разрывов и мощности слоев.

Способы оценивания различных параметров геофизических моделей рассматривали D. W. Marquardt [61], Y. M. Chen, J. H. Seinfeld [62], G. Stoyan [63] и многие другие. Поэтому поводу отметим обзорную работу B. Ursin, K.-A. Berteussen [64] и имеющуюся в ней библиографию.

4.3 Математическая модель и алгоритмы обработки георадарных данных

В данном подразделе рассматривается математическая модель для интерпретации радарограмм, полученных от георадара серии «Зонд-12». Как отмечено в работе [65], для качественной интерпретации радарограмм необходимо сопоставить расчетные данные математической модели с реальными данными, полученными от георадара. В связи с этим исследования как математической модели, так и сопоставление с реальными данными георадара в идеальной слоистой среде позволит получить методику интерпретации радарограмм. Для проведения численных расчетов необходимо иметь табличные значения источника, излучаемого георадаром, следовательно, на первом шаге необходимо восстановить источник. В первой части настоящей статьи рассматривается задача восстановления источника $h(t)$ по реальным данным георадара. Для определения явного аналитического выражения для импульсной характеристики среды $r(t)$ воспользуемся методом, описанным в работе [66]. Суть метода состоит в сведении обратной задачи к системе нелинейных вольтеровских интегральных уравнений второго рода. Получено явное аналитическое выражение для импульсной

характеристики $r(t)$ в однородной среде как решение интегрального уравнения Вольтерра первого рода, $f(t) = \int_0^t r(t-\tau)h(\tau)d\tau$. Где $f(t)$ есть реальные данные, полученные в процессе измерения георадаром в точке наблюдения в однородной среде.

Проведены серии экспериментальных исследований с применением георадара Зонд-12 на вновь созданном лабораторном полигоне. Отличительной особенностью этих исследований является выбор локализованного объекта в виде купола соли, помещенного в идеальную слоистую среду – чистый сухой песок. Выбор такой среды необходим для тестирования математических моделей по определению задачи восстановления источника по реальным данным георадара и глубины залегания локализованных объектов. Проведен цикл расчетов по проверке соответствия результатов математического моделирования реальным данным георадара.

Ключевые слова: обработка радарограммы, восстановление источника, математическое моделирование, результаты расчетов.

4.3.1 Алгоритм восстановления источника

В данном разделе рассматривается задача восстановления источника $h(t)$ по реальным данным георадара. Одна из основных задач электромагнитного зондирования состоит в определении импульсной характеристики среды $r(t)$, т.е. в вычислении отклика среды на импульсный источник возбуждения $\delta(t)$ (дельта функцию). Для определения явного аналитического выражения для импульсной характеристики среды $r(t)$ воспользуемся методом, описанным в работе [66]. Суть этого метода состоит в сведении обратной задачи к системе нелинейных вольтерровских интегральных уравнений второго рода. Этот метод был применен в работе [67] для доказательства разрешимости обратной задачи об определении коэффициентов для уравнений гиперболического типа. Мы получим явное аналитическое выражение для импульсной характеристики $r(t)$ в однородной среде. Для определения функции источника $h(\tau)$ решаем интегральное уравнение Вольтерра первого рода, $f(t) = \int_0^t r(t-\tau)h(\tau)d\tau$ в котором, левая часть $f(t)$ есть реальные данные, полученные в процессе измерения георадаром в точке наблюдения в однородной среде. Отметим также,

что знание функции источника необходимо для решения класса обратных коэффициентных задач для уравнения геоэлектрики при исследовании объектов в неоднородных средах.

Как правило, георадары имеют встроенное программное обеспечение, выходная информация которого представляет собой радарограмму, т.е. временные развертки отраженного сигнала, снятые вдоль трассы. Результат интерпретации существенно зависит от опыта геофизика – интерпретатора и навыков чтения радарограмм, что вносит субъективные факторы в процесс обработки данных.

С другой стороны, существует иное направление интерпретации радарограмм, а именно математическое и компьютерное моделирование процесса распространения и отражения электромагнитных волн в среде. Радарограмма несет информацию о времени пробега до неоднородности, а на практике возникает интерес определить физические характеристики неоднородности. При численном моделировании решения обратной коэффициентной задачи встает вопрос о табличном значении источника возмущения, а также табличного значения отраженных сигналов (откликов сред) в точках измерений. Для решения этих вопросов нами и разработаны выше алгоритмы восстановления источника, и как следствие возбуждения ее получен сигнал, соответствующий реальным данным георадара в точках наблюдения. Вопросы единственности решения обратных коэффициентных задач изучены в работе [68]. Численные алгоритмы решения такого сорта обратных задач достаточно подробно изложены в работе [69], также в ней изучены вопросы сходимости итерационных методов решения определения коэффициентов для уравнений гиперболических типов. Задача восстановления источника цунами рассмотрена в работе [70].

В работе [36] рассмотрена обратная задача идентификации источника, зависящего от пространственной переменной $F(x)$ в одномерном волновом уравнении

$$u_{tt} = c^2 u_{xx} + F(x) H\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad (x, t) \in \{(x, t) | x > 0, -\infty \leq t \leq T\}.$$

Измеренные данные взяты в виде $g(t) := u(0, t)$. Показана взаимосвязь между этой задачей и задачей интерпретации данных георадара (GPR). Разработан неитеративный алгоритм восстановления неизвестного источника $F(x)$. Алгоритм основан на разложении функций $F(x)$ в ряд Фурье и представления решения прямой задачи с помощью функции $F(x)$.

Предложенный алгоритм позволяет реконструировать источник $F(x)$, зависящий от x с достаточной точностью для чистых и зашумленных данных.

В работе [44] предложен алгоритм и программное обеспечение для интерпретации данных георадара по определению диэлектрической проницаемости и проводимости среды. На первом этапе описан алгоритм определения параметров источника, генерируемого георадаром. На втором этапе, используя известный источник, описан итерационный алгоритм определения относительной диэлектрической проницаемости и проводимости среды. Алгоритмы протестированы на реальных данных в известных средах, которые специально были подготовлены на лабораторном полигоне.

В работе [71] исследована обратная задача в частотной области и представлен численный алгоритм решения обратной задачи для уравнения Гельмгольца. В работе [72] авторы представили концепцию «Цифрового месторождения», где, в том числе немаловажная роль отводится георадару, как одному из инструментов получения данных месторождения. В работе [73] предложен метод обработки данных георадара. В [74] рассмотрены обратные задачи для георадаров. Разработан оптимизационный метод определения проводимости и диэлектрической проницаемости среды.

В работах [75, 77] предложены методы учета априорной информации о решении обратной задачи в алгоритме. В [76] проведен обзор методов решения обратных задач для гиперболических уравнений. В [78] получена оценка скорости сходимости итераций Ландвебера для решения двумерной коэффициентной обратной задачи для гиперболического уравнения.

На сегодняшний день проблема точного описания функции источника георадара возникает во всех известных производимых сериях георадаров.

Неточное значения функции источника приводит к ошибке интерпретации данных георадара.

Основной причиной, приводящей к неточному описанию источника георадара, является действие импульса, порядка 10 наносекунд. В указанном промежутке времени практически невозможно измерить амплитуду носителя импульса.

Отметим также, что знание функции источника необходимо для решения обратной задачи, поскольку эффективные алгоритмы

построены не для функции $f(t)$ – отклика среды, данные радара от источника $h(t)$, а для $r(t)$ импульсной характеристики среды, возмущенной дельтой-функцией $\delta(t)$, источника.

Предлагаемый нами способ определения функций источника георадара $h(t)$ опирается на численное решение обратной задачи, в которой неизвестной является функция источника $h(t)$, а известными являются электромагнитные параметры среды: диэлектрическая проницаемость – ϵ , магнитная проницаемость – μ , проводимость – σ , а также задан отклик среды на заданное возбуждение $h(t)$.

Перейдем к описанию математической модели. Рассмотрим постановку задачи, сформулированную и изученную в монографиях [68,69] для уравнения геоэлектрики:

$$\mu\epsilon V_{tt} = V_{zz} + V_{xx} - \mu\sigma V_t + \delta(t)\delta(z)\eta(x) \quad (4.36)$$

$$V|_{t<0} = 0, V_t|_{t<0} = 0 \quad (4.37)$$

$$V(0, x, t) = r(x, t) \quad (4.38)$$

Здесь: ϵ – диэлектрическая проницаемость, μ – магнитная проницаемость,

σ – проводимость среды, $\delta(t)$ – дельта функция Дирака,

$r(x, t)$ – импульсная характеристика среды,

Введем в рассмотрение уравнение геоэлектрики, в которой электромагнитные волны возбуждены источником георадара $h(t)$:

$$\mu\epsilon U_{tt} = U_{zz} + U_{xx} - \mu\sigma U_t + \delta(z)\eta(x)h(t)$$

$$U|_{t<0} = 0, U_t|_{t<0} = 0$$

$$U(0, x^*, t) = f(x^*, t)$$

Здесь: $h(t)$ – функция, описывающая источник георадара в зависимости от времени, $f(x^*, t)$ – отклик среды в точке наблюдения x^* (трасса радарограммы).

Для определения импульсной характеристики среды рассмотрим уравнение Вольтера I рода:

$$f(x, t) = \int_0^t r(x, t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (4.39)$$

В уравнении (4) известна левая часть, т.е. данные радара в точке наблюдения. Функция $h(t)$ – описывает источник радара. Очевидно, что целесообразно определить импульсную характеристику $r(x, t)$ аналитически. С этой целью в дальнейшем мы используем методику

решения прямой задачи (4.36)-(4.38) с постоянными коэффициентами, приведенную в работе [66].

4.3.2 Аналитический метод определения импульсной характеристики

Следуя работе [79], обозначим:

$$a_0^2 = \frac{1}{\mu\varepsilon}, \quad a_1 = -\frac{\sigma}{\varepsilon},$$

и перезапишем задачу (4.36)-(4.38):

$$V_{tt} = a_0^2(V_{zz} + V_{xx}) + a_1 V_t - a_0 \delta(t) \delta(z) \eta(x) \quad (4.40)$$

$$V|_{t<0} = 0 \quad V_t|_{t<0} = 0 \quad (4.41)$$

$$V(0, x, t) = r(x, t) \quad (4.42)$$

Введем вместо V новую искомую функцию u по формуле

$$V = e^{\alpha t} u$$

и полагая $\alpha = \frac{1}{2} a_1$, $c^2 = -\alpha^2 + 2a_1$, задача (4.40)-(4.42) примет вид:

$$u_{tt} = a_0^2(u_{zz} + u_{xx}) + c^2 u + a_0 \eta(x) \delta(t)$$

$$u|_{t<0} = 0, \quad u_t|_{t<0} = 0$$

Далее, чтобы получить явное аналитическое выражение для импульсной характеристики среды, воспользуемся методикой работы [66].

Применим u в ряд Фурье по системе функций $\{e^{ijx}\}$.

$$u(x, z, t) = \sum_y u^j(z, t) e^{ijx}$$

$$\eta(x) = \sum_j \eta_j e^{ijx}$$

Тогда имеем:

$$(u_{tt}^j - a_0^2 u_{zz}^j + (\lambda^j)^2 u^j - c^2 u^j) = \eta_j(z) \delta(t) \quad (4.43)$$

Уравнения (4.43) можно переписать в виде:

$$u_{tt}^j - a_0^2 u_{zz}^j + (\lambda^j)^2 u^j = 0 \quad (4.44)$$

$$u^j|_{t<0} = 0, \quad u_t^j|_{t<0} = 0 \quad (4.45)$$

$$[u_z]_{z=0} = a_0 \eta^j \delta(t) \quad (4.46)$$

и условие (4.42) примет вид

$$u(0, x, t) = r(x, t) = \sum_j r_j(t) e^{ijx}$$

$$u^j(0, t) = r^j(t)$$

Решение уравнения (4.44)-(4.46), имеем вид

$$u^j(z, t) = \frac{1}{2} - a_0 \eta^i(0) J_0 \left(\lambda^j \sqrt{t - z^2} \right) \quad (4.47)$$

Полагая в выражении (4.47) $z = 0$, окончательно получим явное аналитическое выражение для импульсной характеристики среды:

$$r^j(t) = -J_0(\lambda^j t) \lambda^j \eta_0^j, \quad j = 1, N$$

На результаты исследований этого раздела получено авторское свидетельство [80].

4.3.3 Экспериментальные исследования. Интерпретация радарограмм.

9 мая 2019 года на песчаном карьере ТОО «Даур», находящемся в 68 км. от города Нур-Султан по Кургальджинской трассе, были проведены георадарные работы на учебных моделях. В эксперименте участвовали сотрудники Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева: профессор Исаков К.Т., докторант Токсейт Д.К., магистрант Кембай А. и инженер-геофизик Московского физико-технического института Баранчук К.И. В экспериментах использовался радарный комплекс «Зонд-12е» с антенной 300мГц, который подходит для поставленных задач, как по размеру исследуемых объектов, так и по среде, в которой они находятся. Основная подготовка результатов исследования осуществляется с помощью специализированной программы “Prism2”. Программный пакет “Prism2” предназначен для работы в полевых условиях в составе георадара “Zond-12e”, а также в лабораторных условиях при обработке и интерпретации данных радиолокационного зондирования.

Объект «Купол соли» подготовлен следующим образом. На однородном участке песчаного карьера вырыта яма цилиндрической формы с диаметром основания 0,65 м. и высотой цилиндра 0,7 м. В эту яму засыпана соль (50 кг) до образования конусообразного купола. Вершина конуса находится на расстоянии 0,45 м, диаметр конуса в основании 0,5 м, см. Рисунки 4.23-4.25.



Рисунок 4.23 – Яма для объекта



Рисунок 4.24 – Объект «Купол соли»



Рисунок 4.25 – Объект «Купол соли», размеры основания конуса.



Рисунок 4.26 – Проведение измерения с георадаром «Зонд-12». Справа – профессор Искаков К.Т., слева – инженер геофизик Баранчук К.

Схема объекта и расположение профилей изображены на рисунке 4.27.

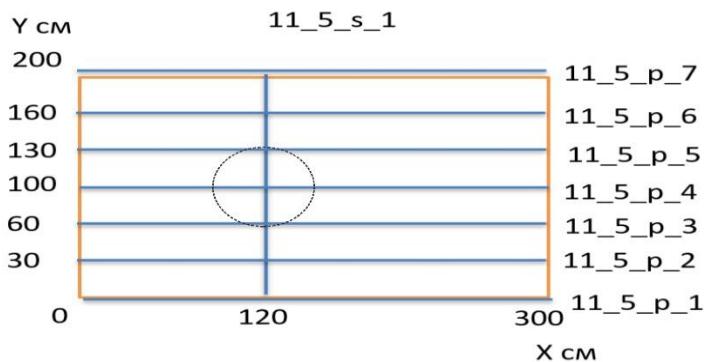


Рисунок 4.27 – Схема объекта и метки профилей

На радарограммах (рис. 4.28-4.35) хорошо выделяется аномальный объект на глубине 35 см на пикетах 80-150 на секущем профиле и на пикетах 130-200 на продольных профилях под номерами 3, 4 и 5. Глубина на профилях 3 и 5 по сравнению с профилем 4 изменяется. Глубина аномального объекта составляет 40 см. Таким образом, можно утверждать, что удалось не только определить латеральное расположение аномального объекта, но и откартирововать его геометрию по глубине (рис. 4.36).

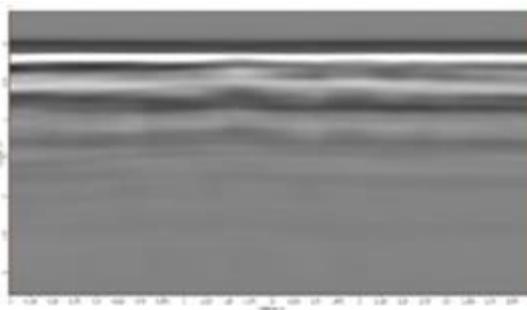


Рисунок 4.28 - Радарограмма первого продольного на участке

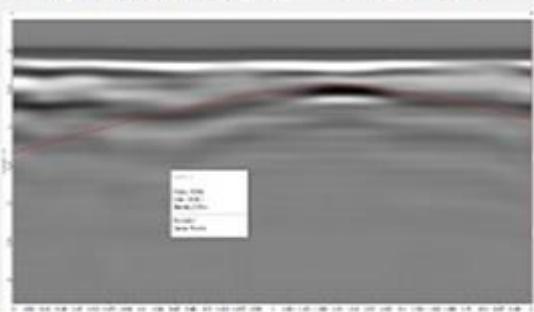


Рисунок 4.30 - Радарограмма третьего продольного на участке

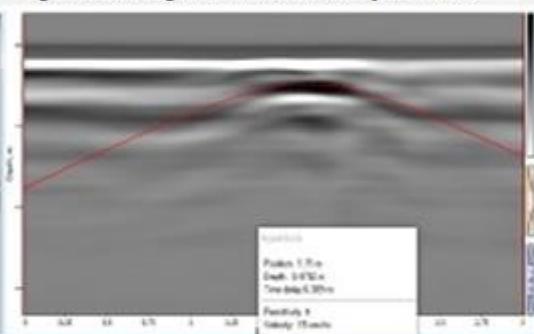


Рисунок 4.32 - Радарограмма пятого продольного на участке

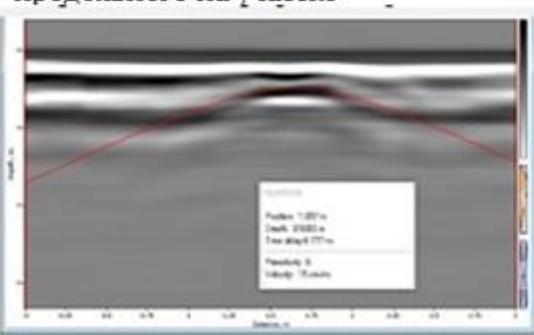


Рисунок 4.34 - Радарограмма седьмого продольного на участке

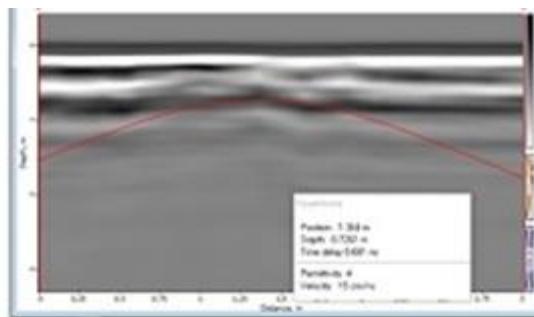


Рисунок 4.29 - Радарограмма второго продольного на участке

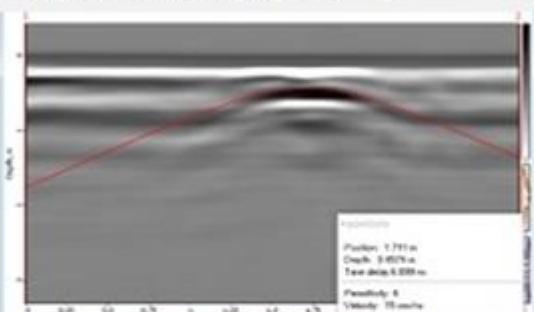


Рисунок 4.31- Радарограмма четвертого продольного на участке

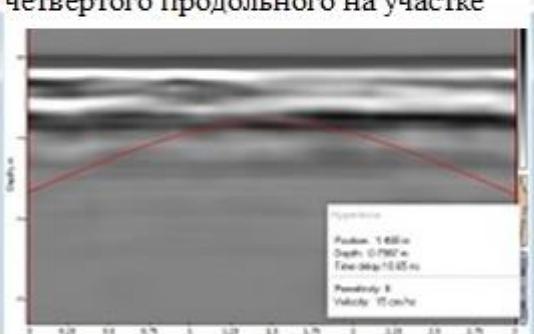


Рисунок 4.33 - Радарограмма шестого продольного на участке

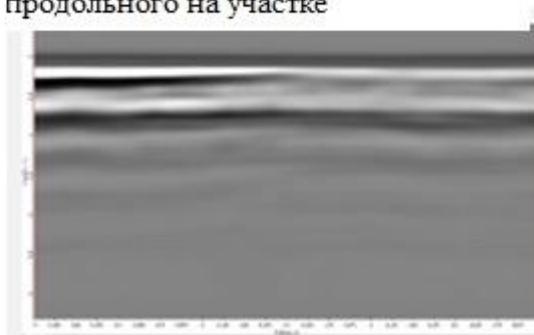


Рисунок 4.35 - Радарограмма восьмого продольного на участке

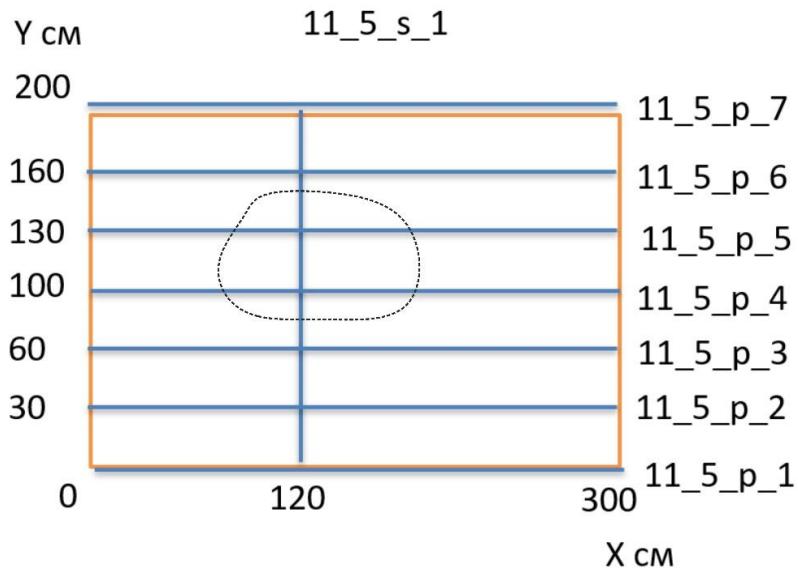


Рисунок 4.36 – План аномальных зон на карте фактического материала

4.3.4 Математическое моделирование. Численные расчеты.

Рассмотрим систему уравнений Максвелла [68]:

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} - \operatorname{rot} H + \sigma E + j^{cm} = 0, \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} + \operatorname{rot} E = 0, \end{cases} \quad (x, y, z) \in \mathbb{R}^3, \quad x \neq 0, \quad t > 0. \quad (4.48)$$

Здесь положительные функции $\varepsilon(x, y, z)$, $\sigma(x, y, z)$ и $\mu(x, y, z)$ диэлектрическая проницаемость, проводимость и магнитная проницаемость среды, соответственно.

$$R_-^3 = \{x, y, z \in \mathbb{R}^3, \quad x < 0\} - \text{воздух}; \quad R_+^3 = \{x, y, z \in \mathbb{R}^3, \quad x > 0\} - \text{земля}.$$

Считаем, что электромагнитные колебания до момента времени $t = 0$ отсутствуют:

$$(E, H) \Big|_{t < 0} \equiv 0, \quad j^{cm} \Big|_{t < 0} \equiv 0$$

а затем индуцируются сторонним током $j^{cm}(x, y, z, t)$

Рассмотрим один из простейших вариантов задачи, когда ε , σ и μ зависят только от глубины x и одной горизонтальной переменной y , а источником стороннего тока является достаточно длинный (бесконечный) кабель, расположенный по центру и протянутый вдоль оси z :

$$j^{cm}(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} g(x, y) V(t). \quad (4.49)$$

Здесь функция $g(x, y)$ описывает поперечные размеры источника.

В этом случае, пренебрегая влиянием концов кабеля, заключаем, что в системе уравнений Максвелла ненулевыми останутся только три компоненты E_z, H_x, H_y .

После исключения из первого уравнения частных производных компонент H_x и H_y , получим относительно E_z уравнение второго порядка :

$$\mu\epsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} - g(x, y)V'(t), \quad (4.50)$$

к которому добавим начальное условие

$$E_z \Big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0,$$

и граничные условия:

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = 0, \quad E_z \Big|_{x=x_2} = 0, \quad E_z \Big|_{y=-y_1} = 0, \quad E_z \Big|_{y=+y_1} = 0;$$

и условия на границе раздела сред:

$$[E_z]_{x=x_1} = 0, \quad \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} \right]_{x=x_2} = 0, \quad [E_z]_{x=x_3} = 0, \quad \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} \right]_{x=x_3} = 0,$$

где: $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_{rel}$, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} F/m$ - диэлектрическая постоянная,

ϵ_{omn} - относительная диэлектрическая проницаемость

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}, \quad \sigma - \text{См/м}, \quad V(t) = \exp \left\{ -\frac{(t-t_0)^2}{t_1^2} \right\}, \quad g(x, y) = \theta(a-x)\theta(a-y)$$

$a = 0.025 \text{ м}$ - размер источника. $V'(t)$ - функция, описывающая источник электромагнитных колебаний, излучаемых - передающей антенной.

Численные расчеты

Для проведения численных расчетов конкретизируем постановку задачи, приведенной выше, предварительно введя соответствующие обозначения.

Рассматривается двумерная задача в области $\Omega = \{(z, y) : z \in [0 \text{ м}, 2 \text{ м}], y \in [0 \text{ м}, 3 \text{ м}]\}$, смотрите рисунок 4.37.

$$\mu\epsilon_{tt} + \mu\sigma_t + \mu\theta(a-z)\theta(a-r), \quad \delta(t) = \Delta\upsilon(z, y) \in \Omega;$$

$$\upsilon|_{t=0} = 0, \quad \upsilon_t|_{t=0} = 0;$$

$$\begin{aligned}
 v_z|_{z=0} &= 0, v|_{z=2} = 0; \\
 v_y|_{y=0} &= 0, v|_{y=3} = 0; \\
 [v]_{y=0.1} &= 0, [v_y]_{y=0.1} = 0.
 \end{aligned}$$

Здесь: $\varepsilon = \varepsilon_a \varepsilon_0$, $\varepsilon_a = 8.854187 \cdot 10^{-12} \Phi/\text{М}$, $\mu = 4\pi 10^{-7} H \cdot A^{-2}$, $\sigma = C_M/M$, $a = 0.025$
 М -- сторона источника.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{omn} &= \begin{cases} \varepsilon_1 = 81, z \in (-0.1, 0.1) \\ \varepsilon_2 = 5, |z| \in (0.1, 0.3); \\ \varepsilon_3 = 49, |z| \in (0.3, 3) \end{cases} \\
 \sigma &= \begin{cases} \sigma_1 = 0.5, z \in (-0.1, 0.1) \\ \sigma_2 = 0.006, |z| \in (0.1, 0.3); \\ \sigma_3 = 0.05, |z| \in (0.3, 3) \end{cases}
 \end{aligned}$$

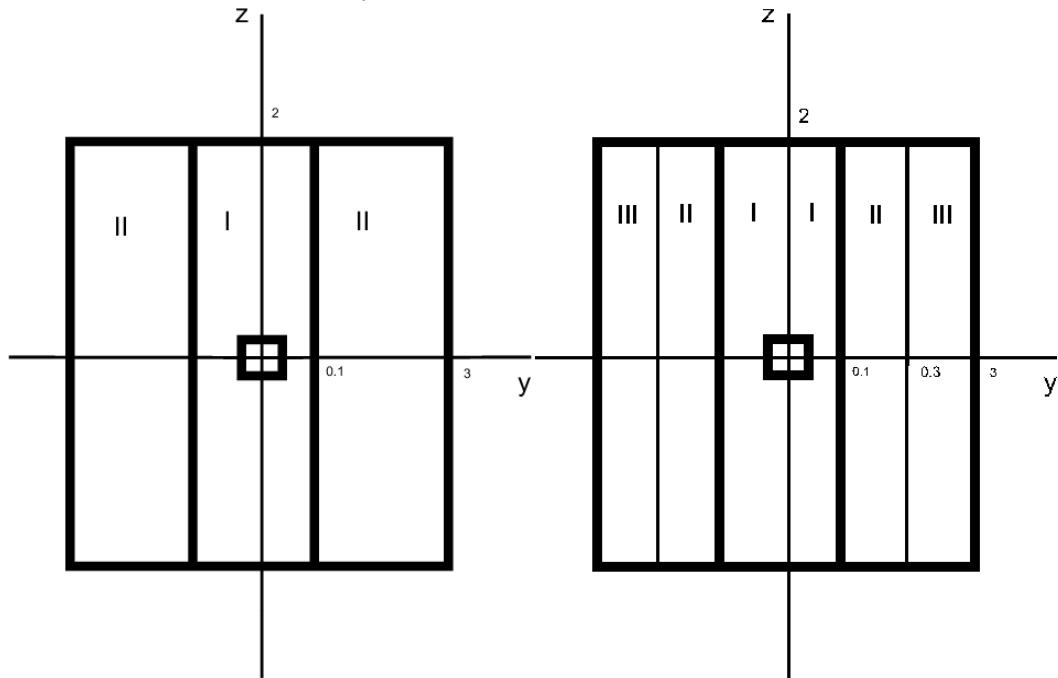


Рисунок 4.37 – Область Ω

В центре области Ω расположен источник квадратной формы со стороной 0.05 м. (см. Рис. 4.37).

Вид источника (импульс Пузырева) по времени - см. Рисунок 4.38. и задавался по формуле:

$$\sin(\omega(t - t_0)) \cdot \exp(-k \cdot k \cdot (t - t_0)(t - t_0)).$$

Где: $\omega = 3.0$; $t_0 = 0$; $k = 0.7$.

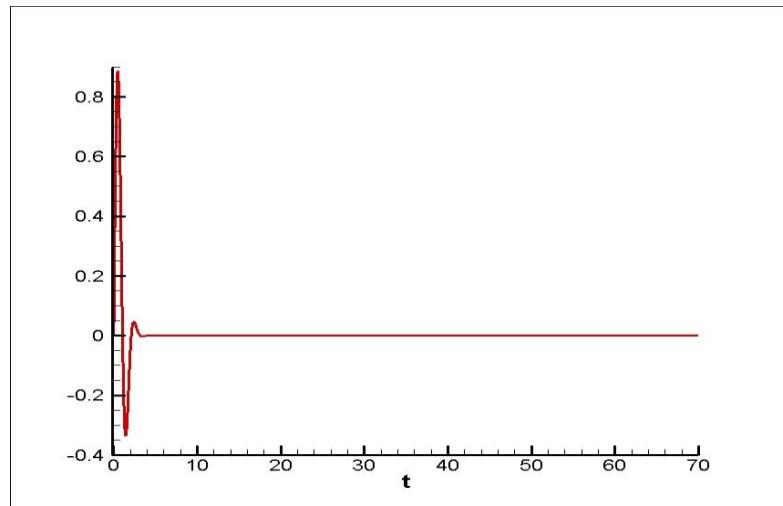


Рисунок 4.38 – Источник (импульс Пузырева)

Экспериментальные данные: Рассмотрим однородную среду на участке 5 метров на 5 метров с включением в виде «куполя соли», с размерами: высота конуса 0.25 м., диаметр основания конуса 0.45 м, находящийся на глубине 0.43 м. Емкость внешнего котлована цилиндрической формы: высота 0.6 м, с диаметром основания 0.5 м. Ниже приведены реальные данные геоэлектрического разреза однородной среды и включения «купол соли» (см. Рис. 4.39).

Сухой песок	$\epsilon_1 = 6$	$\sigma_1 = 0.62$	$h_1 = 0.65 \text{ м}$
Купол соли	$\epsilon_2 = 1$	$\sigma_2 = 0.769 \cdot 10^7$	$h_2 = 0.25 \text{ м}$

Параметры расчетной области: источник действовал на площадке шириной 0.2 метра на поверхности $z=0$ в центре области и по переменной y ($y=2.5$ метра). Время наблюдения – 70 нс по времени. Шаг по пространству 0.005 м, по времени 0.001298 нс.

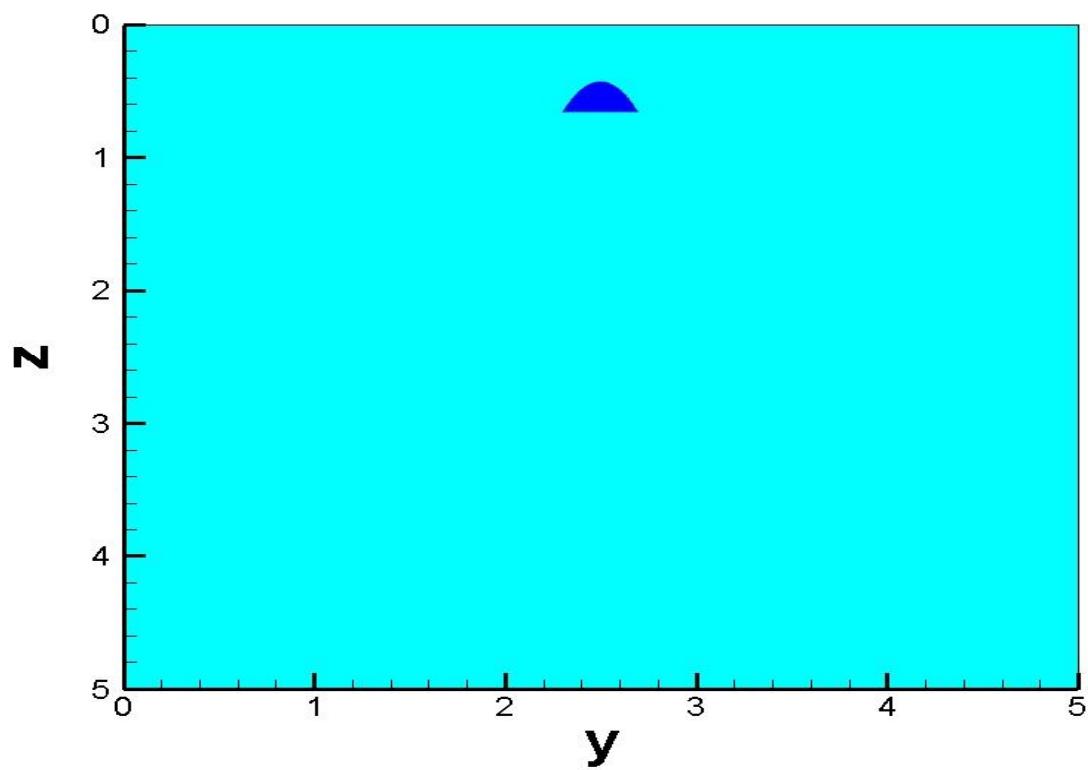


Рисунок 4.39 – Соляной купол

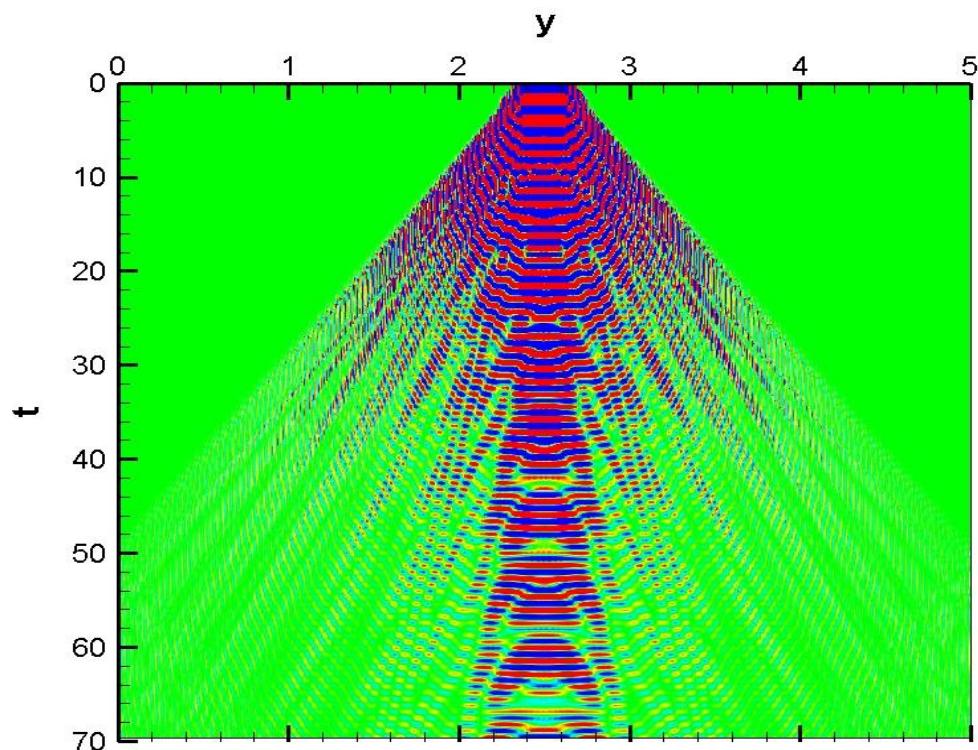


Рисунок 4.40 – Отклик однородной среды

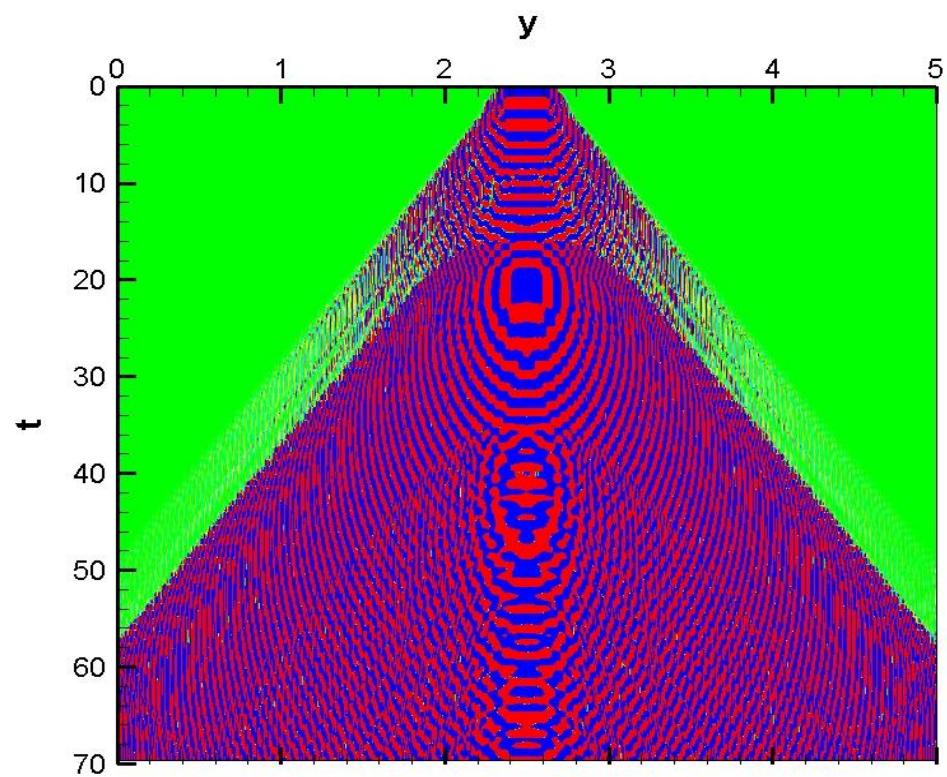


Рисунок 4.41 – Отклик среды с соляным куполом

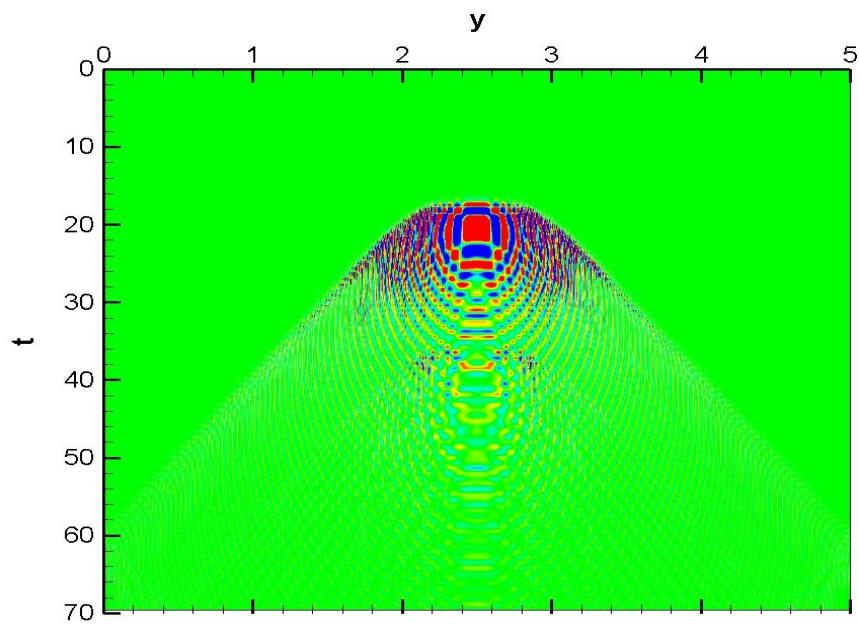


Рисунок 4.42 – Аномальное поле. Разность между откликом однородной среды и откликом среды с соляным куполом

Отклик однородной среды (см. рис 4.40) и отклик среды (см. рис. 4.41) с соляным куполом хорошо согласуются с данными радарограммы, полученными с помощью георадара. Видно из рисунка 4.42, что рассчитанное аномальное поле показывает наличие

неоднородности, так же, как и на рис. 4.28-4.35. При этом, данные радарограммы обрабатывались от нескольких источников и приемников.

Список использованных источников к Разделу 4:

1. Iskakov K.T., Tokseit D.K., Oralbekova Zh.O., Mirgalikyzy T. Creation and testing of a new mathematical software for processing georadar data// Eurasian Journal Of Mathematical And Computer Applications, 2019, v. 7, n. 4. DOI: 10.32523/2306-6172-2019-7-4-86-99.
2. Исқаков К.Т., Боранбаев С.А., Оралбекова Ж.О., Омарханова Д.Ж. Определение геоэлектрического разреза подповерхностных объектов //«Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом» №5062 от 28 августа 2019 г.
3. Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н., Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах // Известия АН СССР, сер. Геофизическая, 1956, № 3, с. 251-254.
4. Дмитриев В.И., Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде // Вычислительные методы и программирование, 1968, т. 10, с. 55-65.
5. Карчевский А.Л., Метод численного решения системы упругости для горизонтально слоистой анизотропной среды // Геология и Геофизика, 2005, т. 46, № 3, с. 339-351.
6. Карчевский А.Л., Прямая динамическая задача сейсмики для горизонтально-слоистых сред // Сибирские Электронные Математические Известия, 2005, т.2, с. 23-61.
7. Карчевский А.Л., Аналитическое решение уравнений Максвелла в частотной области для горизонтально-слоистых анизотропных сред // Геология и Геофизика, 2007, т. 48, № 8, с. 889-898.
8. Karchevsky A.L., Rysbayuly B.R., Analytical expressions for a solution of convective heat and moisture transfer equations in the frequency domain for layered media // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, 2015, v. 3, n. 4, p. 55-67.
9. Karchevsky A.L., Numerical Solution to the One-Dimensional Inverse Problem for an Elastic System. Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences/Earth Science Section. Doklady, 2000, V. 375, n. 2, p. 235–238.

10. Karchevsky A.L., Rysbayuly B.R., Analytical expressions for a solution of convective heat and moisture transfer equations in the frequency domain for layered media // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, 2015, v. 3, n. 4, p. 55-67.
11. Vasiliev F. P., Numerical methods for solving extremal problems. M.: Science, 1988, 550 C.
12. Градштейн И.С., Рыжик И.М., Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, изд. 4-е, 1962.
13. Karchevsky A.L., Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems, 2009, v. 17, n. 4, p. 385-402. DOI 10.1515/JIIP.2009.026.
14. Kurpinar E., Karchevsky A.L., Numerical solution of the inverse problem for the elasticity system for horizontally stratified media. Inverse Problems, 2004, V. 20, V. 3., P. 953–976. DOI: 10.1088/0266-5611/20/3/018.
15. Karchevsky A.L., Numerical reconstruction of medium parameters of member of thin anisotropic layers. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2004. V. 12, N 5. P. 519–634. DOI: 10.1515/1569394042531332.
16. Karchevsky A.L., Reconstruction of pressure velocities and boundaries of thin layers in thinly-stratified layers. J. Inv. Ill-Posed Problems 18 (2010), n.4, 371-388. DOI:10.1515/jiip.2010.015.
17. Nazarov L.A., Nazarova L.A., Karchevskii A.L., Panov A.V., Estimation of Stresses and Deformation Properties of Rock Masses Which Is Based on the Solution of an Inverse Problem From the Measurement Data of the Free Surface Displacement //Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2013. V. 7, N. 2. P. 234_240. DOI:doi.org/10.1134/S1990478913020130.
18. Measurements in Bottom Sediments. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2013. V. 7, N 4, P. 480–502. DOI: 10.1134/S1990478913040042.
19. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Karchevsky A.L., Vandamme M., Determining Kinetic Parameters of a Block Coal Bed Gas by Solving Inverse Problem Based on Data of Borehole Gas Measurements. Journal of Mining Science. 2015. V. 51, N 4. P. 666_672. DOI: 10.1134/S1062739115040027.
20. Karchevsky A.L., Determination of the Possibility of Rock Burst in a Coal Seam // Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2017. V. 11, N. 4. P. 527_534. DOI:10.1134/S1990478917040019.

21. Karchevsky A.L., Nazarova L.A., Zakharov V.N., L.A. Nazarov L.A. Stress state estimation in coal bed under random conditions in contact zone with enclosing rocks based on inverse problem solution. *Gornyi zhurnal*. 2017. № 11. P. 37–40 DOI: 10.17580/gzh.2017.11.
22. Тихонов А.Н., Арсений В.Я. Методы решения некорректных задач. //М.: Наука, 1979 - 285 с.
23. Cannon J. R. and DuChateau P. An inverse problem for an unknown source term in a wave equation, *SIAM J. Appl. Math.* Vol.43(3) (1983) 553-564.
24. Chapouly M., Mirrahimi M. Distributed source identification for wave equations: An off-line observer-based approach, *Automatic Control, IEEE Trans.* 57(8) (2012) 2076-2073.
25. Deguenon J., Sallet G., Xu C.-Z. Infinite dimensional observers for vibrating systems, in *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, (2006) 3979-3983.
26. Isakov V, Inverse Source Problem, Mathematical Surveys and Monographs, Vol. 34, American Mathematical Society, 1990.
27. Kabanikhin S.I., Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications, De Gruyter, Germany, 2011.
28. Kabanikhin S.I., A. D. Satybaev and M. A. Shishlenin, Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problem, VSP, Utrecht, 2004.
29. Kabanikhin S.I., Iskakov K.T. Inverse and ill-posed problems for hyperbolic equations, Almaty, KazNPU, 2007 (in Russian).
30. Beilina L. and Klibanov M.V. Approximate Global Convergence and Adaptivity for Coefficient Inverse Problems, Springer, New York, 2012.
31. Maarten V de Hoop, Justin Tittelfitz, An inverse source problem for a variable speed wave equation with discrete-in-time sources, *Inverse Problems*, 31(7), (2015) , 075007.
32. Symes Rakesh W.W. Uniqueness for an inverse problem for the wave equation, *Commun. Partial Diff.*, Eq. 13 (1988) 87-96.
33. Romanov V.G., Kabanikhin S.I. Inverse Problems for Maxwell's Equations. Utrecht, The Netherlands: VSP. 1994.
34. Stolt R.H., Migration by Fourier transform, *Geophysics*, Vol.43(1), (1978), 23-43.
35. Caner Ozdemir, Fevket Demirci, Enes Yi˘git, and Betu˘l Yilmaz, A Review on Migration Methods in B-Scan Ground Penetrating Radar

Imaging, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, Article ID 280738, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/280738>.

36. Mukanova B.G. Inverse source problem for wave equation and GPR data interpretation problem /B.G. Mukanova, V.G.Romanov // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2016. – 4 – №3 – P. 15-28.
37. Финкельштейн М.И., Основы радиолокации: учебник для вузов. – 2–е изд., перераб. и доп., М.: Радио и связь, 1983.– 536 с.
38. Владов М.Л., Введение в георадиолокацию: учебное пособие, М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
39. Iskakov K.T., S.A. Boranbaev, N. Uzakkyzy, Wavelet processing and filtering of the radargram trace, Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, Vol 5(4), 2017, 43-54.
40. Karchevsky A.L., Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems, Vol. 17(4), 2009, 385-402. DOI 10.1515/JIP.2009.026
41. Александров П.Н., Теоретические основы георадарного метода, Москва. Физматлит., 2017. – 112 с.
42. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Наука, 2008. – 656 с.
43. Исаков К.Т., Mukanova B.G., Berdyshev, Kembay A.S., Tokseit D.K. Mathematical modeling of the source and response environment for the equation of geoelectrics, Вестник Карагандинского государственного университета, Караганда, 2 (94), 2019.
44. Iskakov K.T., Tokseit D.K., Oralbekova Zh.O., Mirkalikyzy T. Creation and testing of a new mathematical software for processing georadar data, Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, Vol. 7 (4), 2019, DOI: 10.32523/2306-6172-2019-7-4-86-99.
45. Ingrid Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, 2006, ISBN: 780-89871-274-2.
46. Romanov V.G. Inverse Problems for Maxwell's Equations. / V.G. Romanov, S.I. Kabanikhin.// Utrecht, The Netherlands: VSP. – 1994. – 249 p.
47. Iskakov K. T. The solution of one-dimensional inverse problem of geoelectrics by the method of conjugate gradients / K.T. Iskakov, S.I. Kabanikhin // Journal Theoretical and Applied Mechanics. – 1992. – 2 – №3. – P. 197–221.
48. Koptyug I. V. A quantitative NMR imaging study of mass transport in porous solids during drying / I. V. Koptyug, S.I. Kabanikhin, K.T.

Iskakov, V.B. Fenelonov, L.Yu. Khitrina, R.Z. Sagdeev, V.N. Parmon // Journal Chemical Engineering Science. – 2000. – 55 – P. 1559– 1571.

49. Koptyug I. V. An H NMR microimaging study of water vapor sorption by individual porous pellets / I.V. Koptyug, L.Yu. Khitrina, Yu. I. Aristov, M.M. Tokarev, K.T. Iskakov, V.N. Parmon, R.Z. Sagdeev // Journal of Physical Chemistry. B. – 2000. – 104 – P. 1695–1700.

50. Kabanikhin S. I. Inverse problem for a quasi-linear equation of diffusion / S.I. Kabanikhin, I.V. Koptyug, K.T. Iskakov, R.Z. Sagdeev // Journal of Inverse Ill-Posed Problems. – 1998. – 6 – №4 – P. 335–353.

51. Kabanikhin S. I. Inverse problem for diffusion transport of water upon single pellet moisture sorption / S.I. Kabanikhin, I.V. Koptyug, K.T. Iskakov, R.Z. Sagdeev // International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. – 2000. – 1 – №1 – P. 31–42.

52. Kabanikhin S. I. H_1 -conditional stability with explicit Lipschitz constant for a one-dimensional inverse acoustic problem / S.I. Kabanikhin, K.T. Iskakov, M. Yamamoto // *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*. – 2001. – 9. – №3. – P. 249–267.

53. Mukanova B. Fourier Collocation Algorithm for identification of a spacewise dependent source in wave equation from Neumann-type measured data / B. Mukanova, A. Hasanov // Applied Numerical Mathematics. – 2017. – 111 – P. 49-63. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168927416301738>

54. Mukanova B.G. Inverse source problem for wave equation and GPR data interpretation problem / B.G. Mukanova, V.G. Romanov // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. – 2016. – 4 – №3 – P. 15-28.

55. Iskakov K.T. Experimental data of research using ground-penetrating radar "Zond-12c" and interpretation Georadarograms / K.T. Iskakov, S. Boranbayev, Z. Alimbayeva, B. Isin // ACTA PHYSICA POLONICA A. – 2016. – 130 – P. 322-324. Retrieved from <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/130/a130z1p087.pdf>

56. Iskakov K.T. Wavelet processing and filtering of the radargram trace / K.T. Iskakov, S.A. Boranbaev, N. Uzakkyzy // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications – 2017. – 5. – №4 – P. 43-54.

57. Oralbekova Zh.O., Iskakov K.T., Karchevsky A.L. Existence of the residual functional derivative with respect to a coordinate of gap point of medium / Zh.O. Oralbekova, K.T. Iskakov, A.L. Karchevsky // Applied and

Computational Mathematics. - 2013.- 12 – № 2. □ P. 222-233. Retrieved from <http://www.acmij.az/view.php?lang=az&menu=journal&id=323>

58. Karchevsky A.L. Solution of the inverse problem of subsurface electric exploration for horizontally stratified medium. / A.L. Karchevsky, Zh.O. Oralbekova, K.T. Iskakov // International Journal of Applied Mathematics. - 2013. - Article ID 432121. □ P.1-9.

59. Iskakov K. T., Oralbekova Zh. O. Resolving Power of Algorithm for Solving the Coefficient Inverse Problem for the Geoelectric Equation Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – Article ID 545689. – P. 1-9. DOI: 10.1155/2014/545689.

60. Karchevsky A.L. Reconstruction of pressure velocities and boundaries of thin layers in thinly-stratified layers / A.L. Karchevsky // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. – 2010. - Vol. 18. – P. 371-388.

61. Marquardt D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters / D.W. Marquardt // Journals SIAM. – 1963. – 11. – P. 431–441.

62. Chen Y. M., Seinfeld J. H. Estimation of spatially varying parameters in partial differential equations / Y. M Chen., J. H. Seinfeld // International Journal of Control. – 1972. – 15. – №3 – P. 487–495.

63. Stoyan G. Numerical experiments on the identification of heat conduction coefficients / G. Stoyan. Theory of Nonlinear Operators (Proc. Fifth Intern. Summer School, Berlin, 1977). – Berlin: Akademie-Verlag, 1978. – P. 259–268.

64. Ursin B. Comparison of some inverse methods for wave propagation in layered media / B. Ursin, K.A. Berteussen // Proceedings of the IEEE. – 1986. – 74. – №3 – P. 7–19.

65. М.И. Эпов, С.И. Кабанихин, В.Л. Миронов, К.В. Музалевский, М.А. Шишленин. Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в около скважинном пространстве нефтегазовых коллекторов // Сибирский журнал индустриальной математики. 2011. Т. 14, № 2. С. 132–138.

66. Благовещенский А.С., Кабанихин С.И. Об одной задаче распространения волн в полубесконечном нерегулярном волноводе. Дифференц. Уравнения. 1983. Том 19. Номер 4. С. 603-607.

67. Кабанихин С.И. Обратные задачи для гиперболических уравнений и конечно-разностные методы их исследования. – Дисс. канд. физ.-мат. Наук-Новосибирск. 1978.-100 с.

68. Романов В.Г., Кабанихин С.И., Обратные задачи геоэлектрики. /М.Наука. 1991 -304 с.
69. Кабанихин С.И., Исаков К.Т. Оптимизационный метод решения коэффициентных обратных задач. Новосибирск. Издательство НГУ. 2001, 316с.
70. Романов В. Г., Мошков П. С. «Одномерная обратная задача об определении источника цунами», Сиб. журн. индустр. матем., 14:3 (2011), 87–99.
71. Shishlenin, M.A., Kasenov, S.E., Askerbekova, Z.A. Numerical algorithm for solving the inverse problem for the helmholtz equation. (2019). Communications in Computer and Information Science. Vol. 998. Pp. 197-207.
72. Кабанихин С.И., Шишленин М. А. Цифровое месторождение. Георесурсы. (2018). Т. 20, № 3. Стр. 139-141.
73. Kabanikhin S.I., Iskakov K.T., Sholpanbaev B.B., Shishlenin M.A., Tokseit D. K. Development of a mathematical model for signal processing using laboratory data. Bulletin of the Karaganda University-Mathematics. (2018). Vol. 92, No. 4. Pp. 148–157.
74. Kabanikhin S.I., Nurseitov D.B., Shishlenin M.A., Sholpanbaev B.B. Inverse problems for the ground penetrating radar. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. (2013). Vol .21, No. 6. Pp. 885–892.
75. Кабанихин С.И., Шишленин М.А.. Об использовании априорной информации в коэффициентных обратных задачах для гиперболических уравнений. Тр. ИММ УрО РАН. (2012). Т. 18, № 1. Стр. 147–164.
76. Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. Numerical Methods for Solving Inverse Hyperbolic Problems. Computational Methods for Applied Inverse Problems, eds. Wang Y., Yagola A.G., Yang C., de Gruyter. (2012). Pp. 369–394.
77. Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. Quasi-solution in inverse coefficient problems. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. (2008). Vol. 16, No. 7. Pp. 705–713.
78. Kabanikhin S.I., Scherzer O., Shishlenin M. A. Iteration methods for solving a two dimensional inverse problem for a hyperbolic equation. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems.(2003). Vol. 11, No. 1. Pp. 87–109.
79. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Том 2. М. Наука. 1974.
80. Токсейт Д.К., Исаков К.Т., Боранбаев С.А. Свидетельство о внесении сведений в государственных реестр прав на объекты,

охраняемые авторским правом на тему «Интерпретация радарограмм геологического разреза на основе экспериментальных расчетных формул» №9319 от 20 апреля 2020 года.

5. РУКОВОДСТВО ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАДАРОГРАММ

5.1 Основы метода георадиолокации.

Физические основы георадиолокации

Георадиолокация (англ. ground-penetrating radar, GPR) – это геофизический метод обследования подземной среды, который выполняется георадаром. Георадар излучает широкополосный сигнал радиочастотного диапазона и регистрирует отражения этого сигнала от различных объектов грунтовой среды.

Структурная схема традиционного георадара состоит из основных блоков: генератора наносекундных импульсов; стробоскопического приемника; широкополосной антенной системы; синхронизатора; модуля интерфейса; микроконтроллера (или компьютера); источника питания.

Распространение электромагнитных волн в различных средах характеризуется скоростью распространения волн, диэлектрической проницаемостью среды, удельным затуханием сигнала (значения этих параметров для основных сред приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1 – Электрофизические характеристики сред

Среда	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	Удельное затухание A , дБ/м	Скорость распространения волн V , м/нс
Воздух	1	0	0,300
Песок влажный	20–30	0,5–5	0,055–0,067
Песок сухой	4–6	0,01–1,5	0,122–0,150
Суглинок влажный	10–20		0,067–0,095
Суглинок сухой	4–6		0,122–0,150
Глина влажная	19–27	2–20	0,058–0,069
Глина сухая	2–7	10–50	0,113–0,212
Торф	50–78		0,034–0,042
Гранит	9		0,100
Бетон сухой	3–7	1–7	0,090–0,113
Асфальт сухой	3–6	2–15	0,122–0,173
Пресный лёд	4	0,1–3,5	0,150
Пресная вода	81	0,10	0,033

Удельное затухание существенно влияет на максимальную глубину обследования. Оно зависит от несущей частоты сигнала,

испускаемого передающей антенной. Скорость распространения электромагнитных волн в среде определяется по формуле

$$V = \frac{c_1}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (5.1)$$

где c – скорость света, 0,3 м/нс; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Электромагнитные импульсы, возникающие в результате возбуждения передающей антенны генератором наносекундных импульсов, распространяются в зондируемой среде, испытывая затухание, рассеяние и отражение на неоднородностях среды. Приемная антenna принимает данные сигналы, преобразует электромагнитный отклик в электрический сигнал, который затем фильтруется, усиливается и регистрируется приемником в аналоговом или цифровом виде. Полученный сигнал оцифровывается и передается в блок цифровой обработки (возможно компьютер), где проводится первичная обработка сигнала, запись во встроенную память для последующей обработки и визуализации.

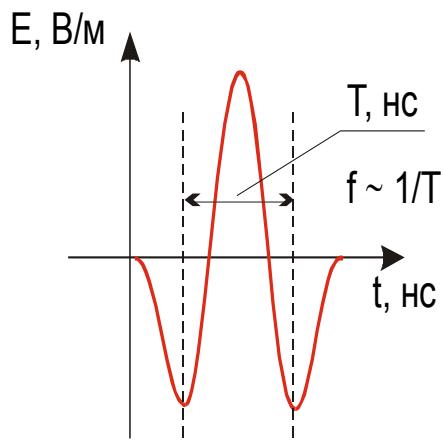


Рисунок 5.1 – Зондирующий сигнал колебаний

Генераторная часть прибора обеспечивает возбуждение зондирующих импульсов в генераторной антенне на двух частотах - 75 и 150 МГц.

Зондирующий сигнал имеет форму 1.5 периода колебаний (см. рис. 5.1). 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.).

Измерительная часть прибора обеспечивает регистрацию отраженных волн с приемной антенны, автоматическую временную регулировку усиления, стробирование и оцифровку сигнала. Результат измерений выводится на дисплей осциллографа, записываясь на жесткий диск компьютера типа «notebook» [1].

Стробирование сигнала обеспечивается блоком управления и синхронизации. Таким образом, одна радаротрасса получается после излучения и стробирования 512 импульсов. На рис. 5.2 приведена схема оцифровки сигнала методом стробирования.

На каждой трассе (трасса - временной процесс отклика на посылку одного импульса) снимается значение амплитуды, соответствующее одному времени задержки. Оцифровка производится через интервал равный:

$$dt = \frac{T_{\text{разв}}}{512},$$

где **dt** - период опроса (мкс), **T_{разв}** - время развертки (нс), **512** - число отсчетов для оцифровки одной трассы.

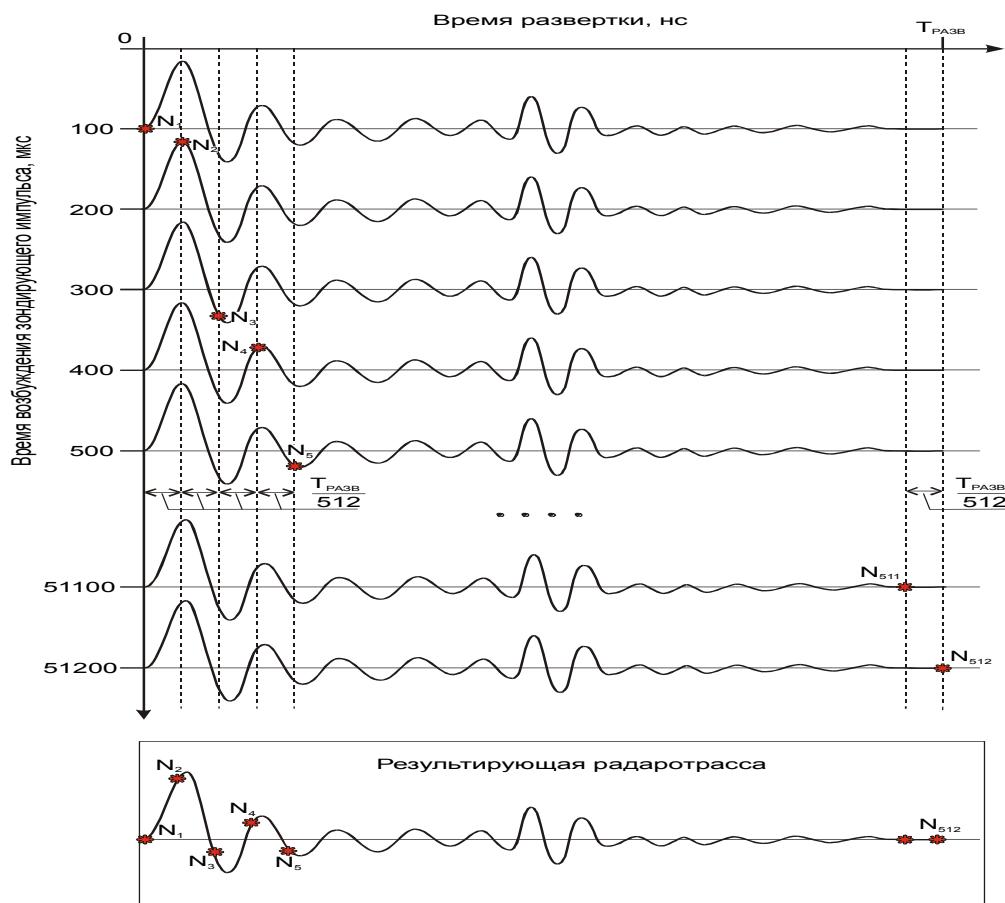


Рисунок 5.2 – Распространение сигнала в однородных средах

Рассмотрим механизм распространения сигнала на простой модели, состоящей из двух однородных слоёв (рис. 5.3, *а*). В начальный момент времени излучается электромагнитный сигнал. Одновременно начинается приём сигнала приёмной антенной. Его распространение с течением времени показано на рис. 5.3, *б–л*. Принятый приёмной антенной сигнал записывается в память прибора. Так формируется **трасса** (запись) – зависимость амплитуды сигнала от времени (рис. 5.4).

Через 5–6 нс после момента излучения сигнала (рис. 5.3, *г, д*) волновой фронт достигает положения приемной антенны. На трассе фиксируется первый всплеск амплитуд. Следующий всплеск происходит в момент времени 25 нс, он связан с тем, что приемник зарегистрировал сигнал, отраженный от границы раздела первого и второго слоев.

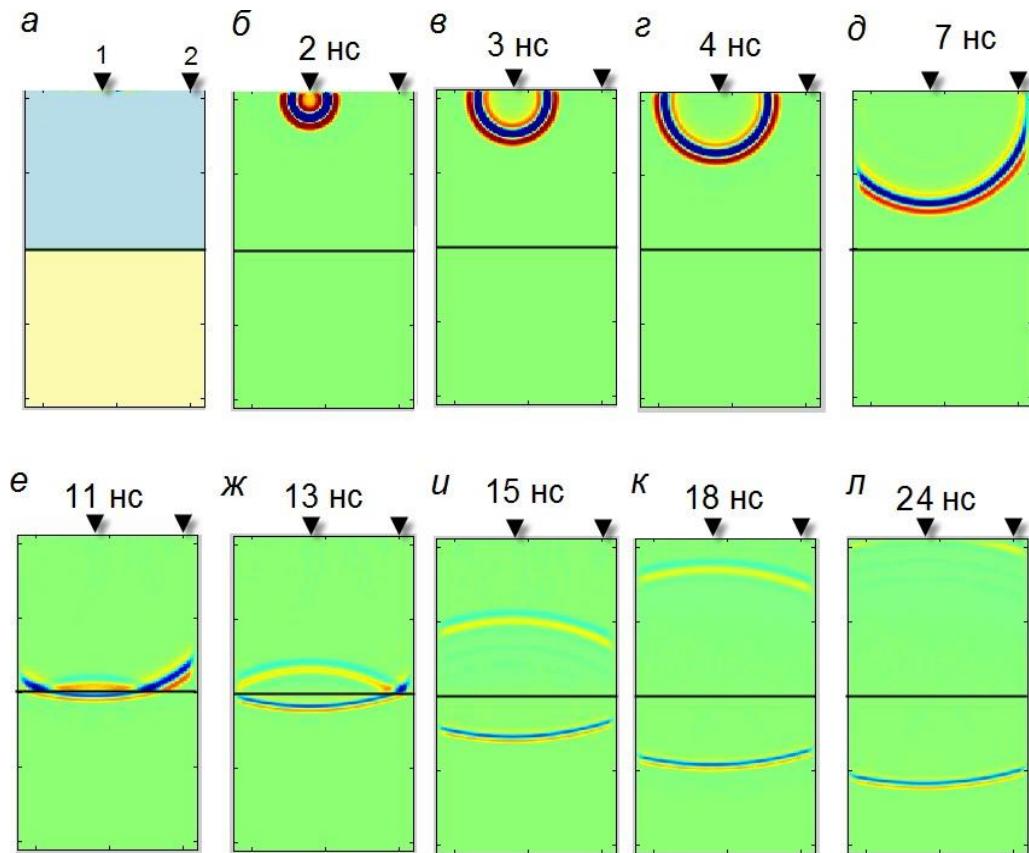


Рис. 5.3. Схема испытания двухслойной среды: *а* – схема зондируемой среды (1 – положение передающей антенны, 2 – положение приёмной антенны); *б–л* – последовательность распространения сигнала в различные моменты времени

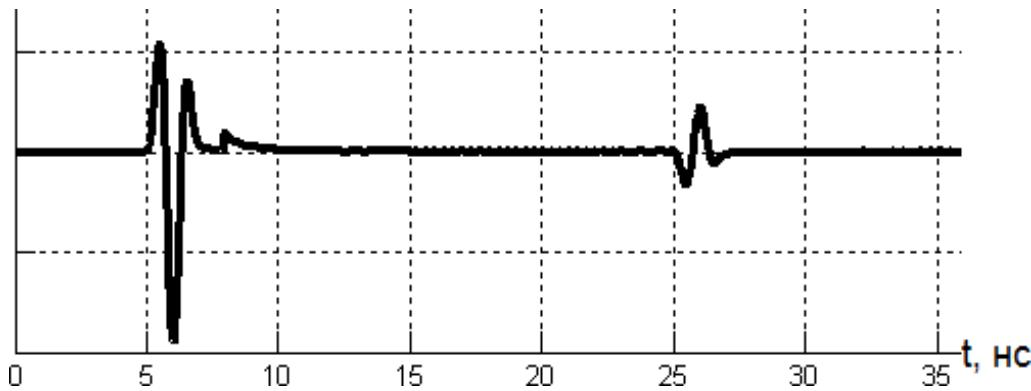


Рис. 5.4. Трасса (запись) полученного сигнала, зависимость амплитуды сигнала от времени

Амплитуда отражённого от границы сред сигнала уже значительно ниже (рис. 5.4), меняется и фаза. Результатом измерения в отдельной точке является трасса, на которой каждый всплеск амплитуды объясняется приходом на приемную антенну новой волны (прямой, отражённой, преломленной или дифрагированной). Общее время трассы называется **временной разверткой** (для георадара «ЛОЗА» разных серий она может составлять 256, 512, 1024 или 2048 нс).

Визуализация радарограмм

Георадарное обследование выполняется в виде серии измерений в отдельных точках, расположенных на профиле. Полученные при каждом отдельном измерении трассы формируют **радарограмму**. Наиболее распространена технология обследования, при которой приёмник и передатчик георадара находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, а оператор с заданным шагом перемещает георадар вдоль заданного профиля. Шаг обследования (перемещения георадара по профилю) составляет от 0,1–0,2 м при детальной диагностике, до 1–2 м и более при предварительной диагностике. На каждой стоянке георадара выполняется измерение, т. е. генерируется электромагнитный сигнал и регистрируется трасса в течение времени, задаваемого временной разверткой. Такая технология называется **георадарным профилированием** (рис. 5.5).

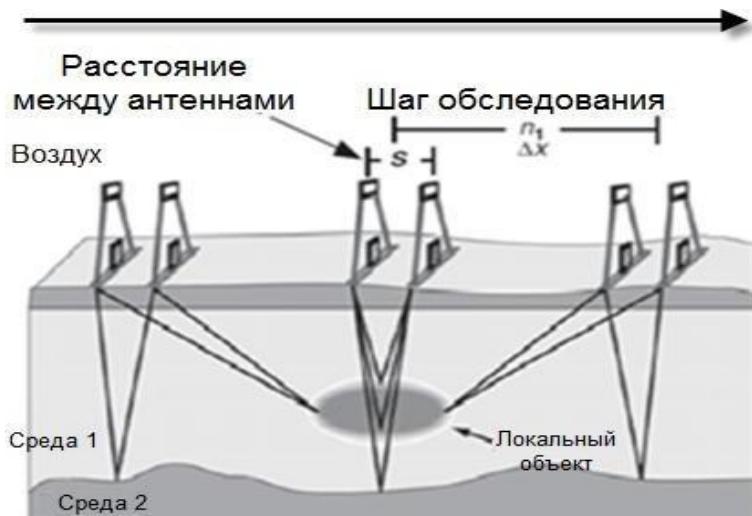


Рис. 5.5 – Схема проведения георадарного профилирования; стрелкой показано направление перемещения георадара по профилю. Сплошными линиями показаны траектории лучей

Таким образом, после записи всех трасс на профиле получается результат георадарного обследования – набор трасс или **радарограмма** (рис. 5.6). Радарограмму можно представить двумя способами.

Первый способ – собственно в виде набора трасс (рис. 5.6, а). Горизонтальная ось радарограммы соответствует пространственному перемещению георадара, вертикальная – времененным отсчетам по каждой трассе.

Второй способ – изображение методом переменной плотности (рис. 5.6, б). В этом случае радарограмма представляет собой графическое изображение, у которого координаты каждого пикселя обозначают соответственно: абсцисса – расстояние от начала профиля, ордината – время прихода сигнала, цвет – амплитуду сигнала (как правило, более тёмные цвета ставятся в соответствие большим значениям амплитуды сигнала).

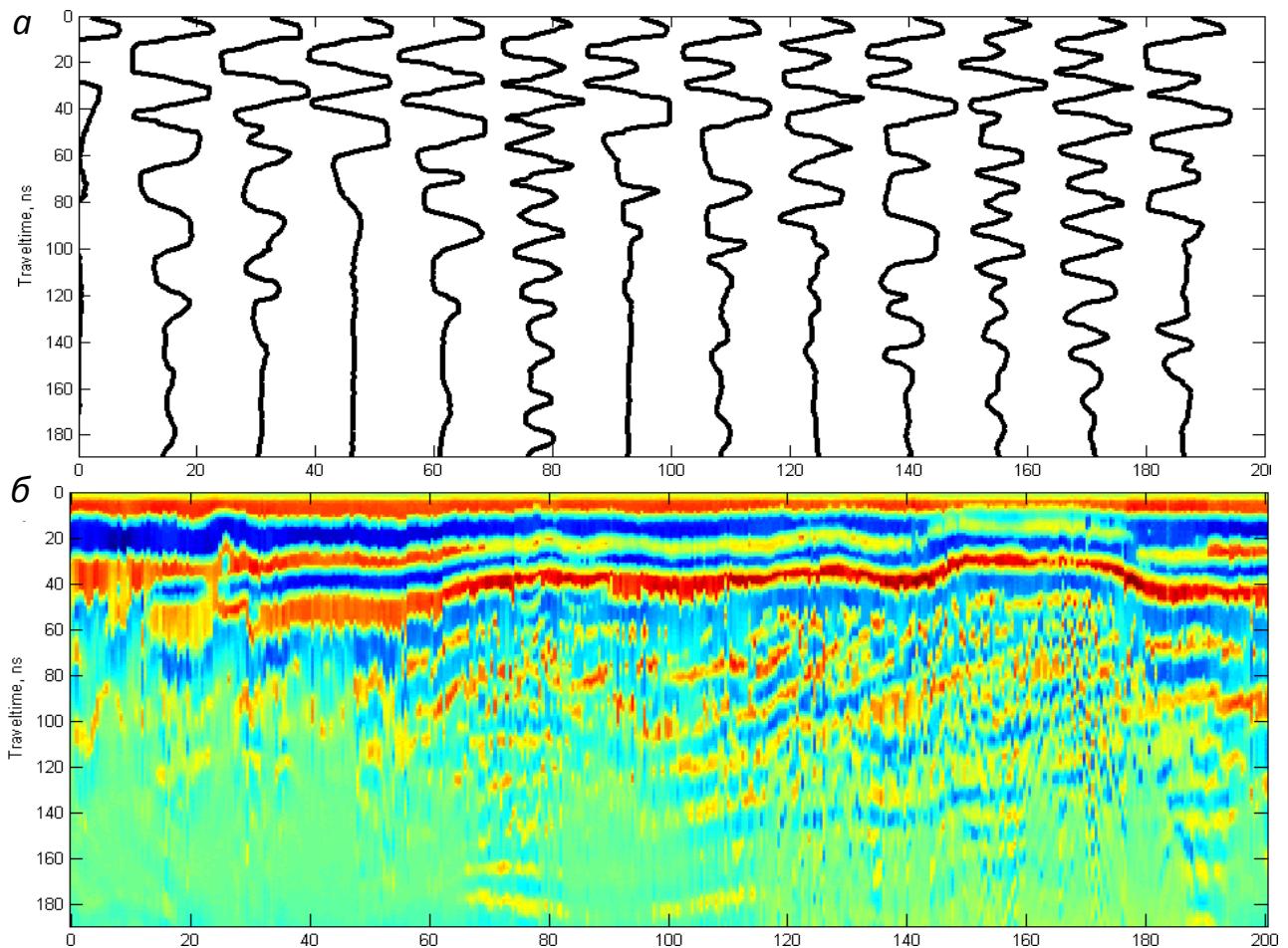


Рисунок 5.6 – Пример радарограммы: *а* – в виде набора трасс; *б* – в виде графического изображения

Анализ полученной радарограммы требует применения специальных методик. Это объясняется несколькими причинами. Во-первых, для решения инженерных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, тогда как исходная радарограмма представляет собой зависимость амплитуды сигнала от времени отражения.

Во-вторых, необходимо избавиться от различного рода помех, скрывающих полезный сигнал (помехи возникают от сигналов,

приходящих к приёмнику по воздуху при отражении от деревьев, проводов, столбов, сооружений и т. п.).

В-третьих, если георадарный профиль располагается на неровной поверхности, требуется высотная привязка радарограммы к рельефу местности (это имеет особое значение при обследовании поперечного профиля земляного полотна). Принципы решения подобного рода проблем изложены в [2, 3, 4, 5, 6].

5.2 Инженерно-технические приемы интерпретации радарограмм

5.2.1 Физические основы интерпретации радарограмм

Результатом георадиолокационной съемки являются временные разрезы (радарограммы), на которых по горизонтали указано расстояние в метрах, а по вертикали - напряженность электрического поля в зависимости от времени и положения установки на профиле. Задачей обработки и интерпретации радарограмм является выделение и прослеживание осей синфазности отраженных волн от различных границ раздела (отражающих границ или горизонтов) волн и их сопоставление с гидрогеологическими особенностями разреза.

Интерпретация результатов представляет собой процесс построения геологического разреза и складывается из двух основных шагов: кинематической и динамической.

Кинематическая интерпретация позволяет по зарегистрированным временам полезных волн восстанавливать положение границ и распределение скоростей электромагнитных волн в слоях среды. Суть кинематической интерпретации состоит в преобразовании временного разреза в глубинный путем преобразования георадарограммы в электрофизическую модель. Для построения этой модели необходимо определить геометрические (толщины) и электрофизические (скорости распространения электромагнитных волн) параметры слоев земляного полотна. Для решения этой задачи необходимы достоверные данные бурения. Кинематическая интерпретация состоит из следующих этапов: построение временного разреза; преобразование временного разреза в глубинный.

а) *Построение временного разреза* базируется на получении информации о временах прихода волн на радарограмме. Определение приближенного времени пробега волны по траектории

источник– граница - приемник и фазы волны на границе, дает возможность выделить временные координаты осей синфазности волн, соответствующих отражениям от основных границ среды. Линию, соединяющую одинаковые фазы одной и той же волны на разных реализациях, называют *осью синфазности*. Выполняют фазовую корреляцию волн по их наиболее четким экстремумам.

б) *Пересчет временного разреза в глубинный* осуществляется с помощью в априори данных скоростей. Значения скоростей распространения электромагнитных волн может меняться вдоль линии профиля, например, если изменяется влажность материала слоев.

Глубинный разрез отражает только геометрию границ слоев. Для получения информации об изменчивости состава необходимо проанализировать в рамках динамической интерпретации.

Динамическая интерпретация основана на количественном анализе интенсивности и формы полезных волн наряду с временами их прихода. Построение динамического георадиолокационного разреза позволяет на качественном уровне оценить изменения состава, плотности и влажности материалов земляного полотна и базируется на выполнении трех этапов обработки:

1. выявление пространственно-временных возмущений волнового поля;
2. восстановление точек дифракции, соответствующих локальным объектам;
3. определение частотных и энергетических характеристик возмущений электромагнитных нерегулярных полезных волн.

1. *Выявление пространственно-временных возмущений волнового поля.*

Для решения этой задачи используют пространственные фильтры высоких частот. Этот вид фильтрации позволяет убрать на георадарограмме протяженные оси синфазности, связанные с отражениями от границ слоев дорожной одежды. На отфильтрованной георадарограмме отчетливо проявляются области возмущений ЭМ волн, связанные со сменой амплитуд, частотного состава и фазой нерегулярных полезных волн. Эти возмущения, как правило, связаны с локальными объектами и неоднородностями грунтов.

2. *Восстановление точек дифракции, соответствующих локальным объектам.*

Под локальными объектами следует понимать неоднородности, глубина расположения которых превышает их размеры, а

электрофизические свойства резко отличаются от свойств вмещающей их среды. Обычно такими объектами являются инженерные коммуникации, водопропускные трубы, крупные камни, бетонные блоки и др. В результате обработки выделяются сигналы от локальных объектов.

3. Определение частотных и энергетических характеристик возмущений электромагнитных нерегулярных полезных волн.

В состав обрабатывающих систем должны входить процедуры определения ряда энергетических и частотных характеристик георадарограммы. Для этого используется преобразование Гильберта, позволяющее получать новые образы временных изображений, путем использования функций мгновенных амплитуды, фазы и частоты аналитического сигнала. Мгновенные значения частоты и фазы позволяют выявлять участки записи с различным частотным составом и фазовыми сдвигами. Модуль амплитуды Гильберта – является огибающей исходного сигнала. Это преобразование позволяет выделить на георадарограмме участки с различным характером электромагнитного волнового поля, отличающиеся более высокой или более низкой энергией сигнала и не имеющие четких границ. Такие интервалы георадарограммы связаны, как правило, с областями исследуемой среды, характеризующимися неоднородным составом или повышенной влажностью.

Примерные последовательности обработки при решении некоторых задач.

а) Картирование локальных объектов – источников дифрагированных волн типа трубопроводов, подземных сооружений, захороненных предметов.

1. Ввод данных.

2. Анализ спектров прямой волны, отражений в области гипербол и шума (частей записи на больших временах).

3. Скользящее суммирование для удаления синфазной помехи (если необходимо) с панелью суммирования порядка 10% от общего числа трасс на экране.

4. Частотная фильтрация.

5. Регулировка амплитуд.

6. Введение статических поправок на основании данных о рельефе профиля и задержке сигнала при записи.

7. Интерполяция записей вдоль профиля в соответствии с масштабом съемки.

8. Скоростной анализ выделенных гиперболических осей синфазности.

9. Миграция с определенной по гиперболам скоростью (контроль определения скорости, анализ осей синфазности, ранее «закрытых» дифрагированными волнами).

10. Преобразование временной оси в ось глубин на основании определений средней скорости распространения волн в разрезе.

11. Вывод результата обработки в цифровом виде и на печать.

Окончательным этапом обработки радарограмм является интерпретация, когда непосредственно решается поставленная инженерная задача. Интерпретация проводится в две стадии: на первой анализируются основные особенности волновой картины, на второй – её локальные особенности. В итоге требуется не только выделить объект в разрезе пройденного профиля, но и получить информацию о расстоянии от поверхности грунта (профиля) до выделенного объекта, т. е. определить точные координаты этого объекта. Таким образом, основной задачей обработки радарограммы является **переход от временного разреза к глубинному разрезу**.

Инженерно-технический метод исследования состоит в сравнении полученных радарограмм с имеющими в базе стандартными видами, а также дополнительными расчетами, основанными на теории распространения волн в среде. Практические и теоретические методы подповерхностной радиолокации описаны в работах авторов дальнего и ближнего зарубежья [2]-[8]. Существуют ряд модификаций прибора производимых различными странами, они предназначены для решения широкого круга задач и инструкции прилагаемые к ним не имеют подробного описания методов интерпретации радарограмм. Это связано с тем, что результат этих исследований имеет коммерческое применение. Качество интерпретации радарограмм зависит от полноты имеющейся базы отраженных сигналов от неоднородностей и опыта навыков чтения геофизика, что вносит индивидуальный характер.

В случае, когда в зондируемой среде находится локальный объект, размеры которого в поперечном сечении меньше длины излученной электромагнитной волны, возникает явление дифракции (рис. 5.7). На практике это означает, что если в зоне профиля находятся локальные объекты, то на полученной радарограмме каждому такому объекту будет соответствовать гиперболический контур (рис. 5.7, в), гипербола.

Если теперь выделить на радарограмме эту гиперболу, то можно описать её математической зависимостью. Любая точка, соответствующая выделенной гиперболе с координатами (x, t_x) , должна определяться уравнением [8]:

$$V = \frac{\sqrt{(x - 0,5a)^2 + h^2} + \sqrt{(x + 0,5a)^2 + h^2}}{t_x}, \quad (5.2)$$

где x – горизонтальное смещение от вершины гиперболы до данной точки, м; t_x – время пробега от передающей антенны до данной точки и обратно к антенне приёмника, нс; V – средняя скорость распространения электромагнитных волн от поверхности земли до вершины гиперболы, м/нс; h – глубина, соответствующая положению вершины гиперболы, м; a – шаг обследования, м.

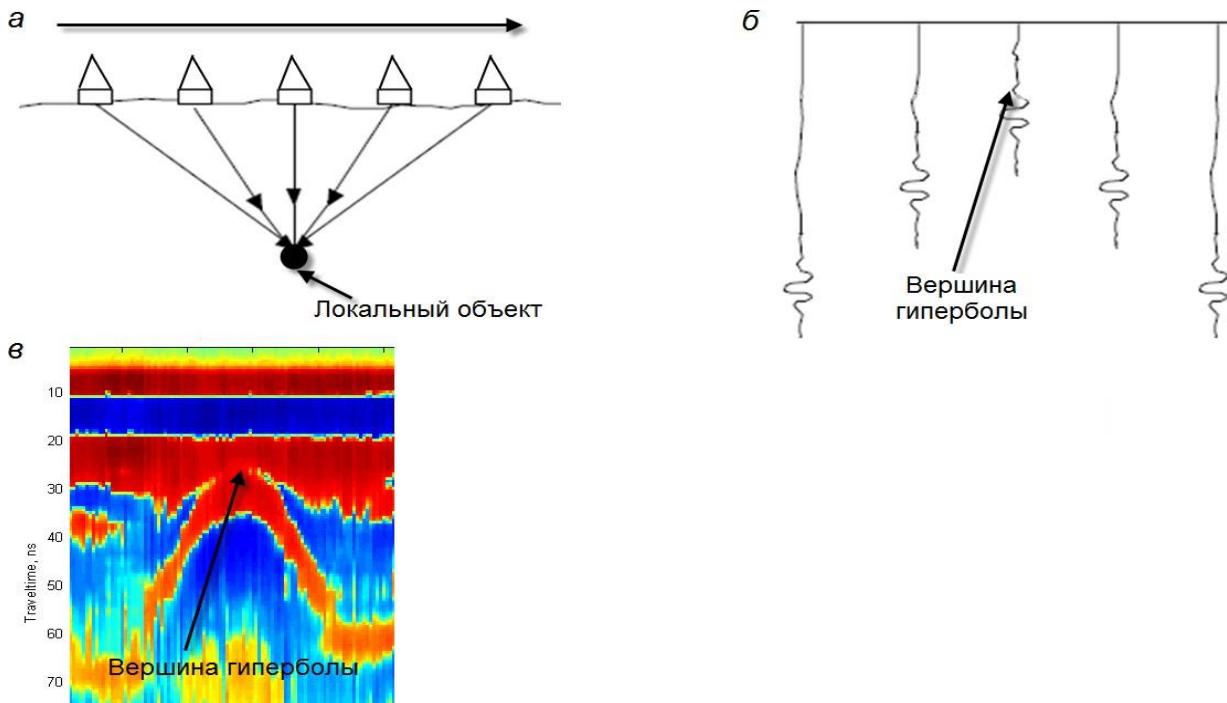


Рисунок 5.7 – Излученной электромагнитной волны

При выделении гиперболы в программе в интерактивном режиме указывают её вершину и наклон ветвей. По этим данным программой составляются уравнения вида (5.2) и рассчитывается глубина h , соответствующая вершине гиперболы, т. е. верхней границе локального объекта.

Таким образом, по параметрам выделенной гиперболы можно

определить местоположение локального объекта, породившего эту гиперболу, глубину его залегания от поверхности грунта, характеристики грунта над локальным объектом.

5.2.2 Интерактивные способы определения геоэлектрического разреза

Построение профиля Георадарное обследование выполняется в виде серии измерений в отдельных точках, расположенных на профиле. Полученные при каждом отдельном измерении трассы формируют радарограмму. Радарограмма представляет собой графическое изображение, построенное методом переменной плотности, у которого координаты каждого пикселя обозначают соответственно: абсцисса – расстояние от начала профиля, ордината – время прихода сигнала. Амплитуды сигналов на радарограмме кодируются цветом из заданной палитры цветов (рис. 1) или в градациях серого цвета. Местоположения подповерхностного объекта определяется вершиной гиперболы построенного по точкам максимальных значений амплитуд каждой трассы [1,9].

Расчет глубины залегания подповерхностного объекта

Расчет глубины залегания подповерхностного объекта в программе осуществляется выбором параметра «Глубина». После ввода пользователем значения относительной диэлектрической проницаемости среды программа вычисляет расстояние от антенны до подповерхностного объекта (рис. 5.8).

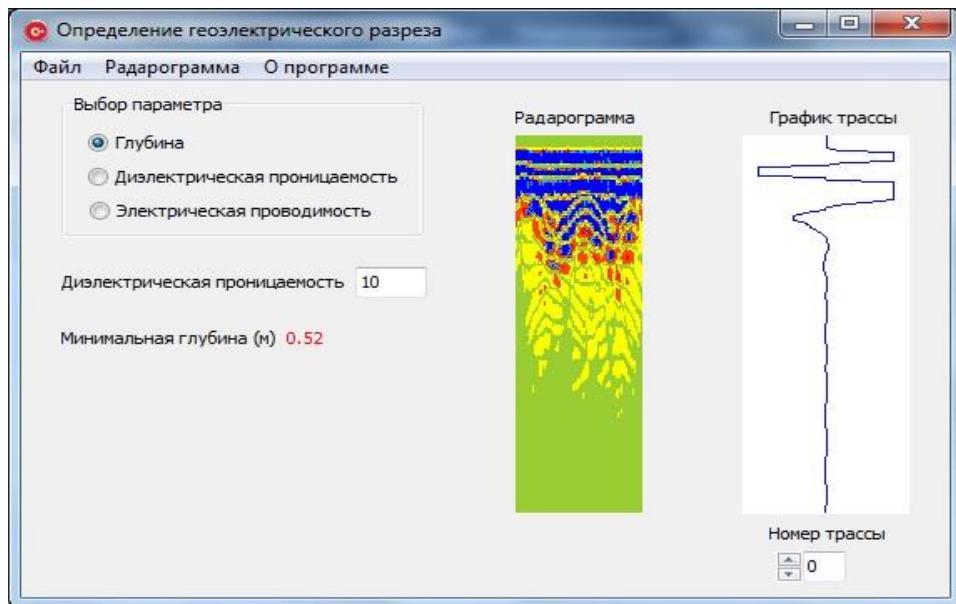


Рисунок 5.8 – Диалоговый экран расчета глубины залегания подповерхностного объекта

Для обнаружения объекта георадиолокационным методом необходимо, чтобы объект заметно отличался от вмещающего грунта по электрическим характеристикам (по диэлектрической проницаемости или проводимости).

В грунте скорость электромагнитных волн уменьшается, поскольку она зависит от относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r , относительной магнитной проницаемости μ_r и проводимости среды σ . Скорость электромагнитных волн в среде определяется следующей формулой [7]:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\omega \epsilon})^2}}{2}}}$$

где c - скорость электромагнитной волны в вакууме ($0,3\text{м/нс}$), $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость и ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость в свободном пространстве ($8,854 \cdot 10^{12} \text{ F/m}$), $\omega = 2\pi f$ угловая частота, где f - частота, а выражение $\sigma/\omega\epsilon$ коэффициент потерь. В немагнитных ($\mu_r = 1$) материалах с малыми потерями, таких как чистый песок и гравий, где $\sigma/\omega\epsilon \approx 0$, скорость электромагнитных волн вычисляется по формуле:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

При заданной относительной диэлектрической проницаемости среды, расстояние от антенны до объекта вычисляется по формуле:

$$h = \frac{vt_{min}}{2} = \frac{ct_{min}}{2\sqrt{\epsilon_r}}$$

t_{min} определяется как минимальное время прихода радиосигнала выбранное из всех трасс с максимальной амплитудой (рис. 5.9).

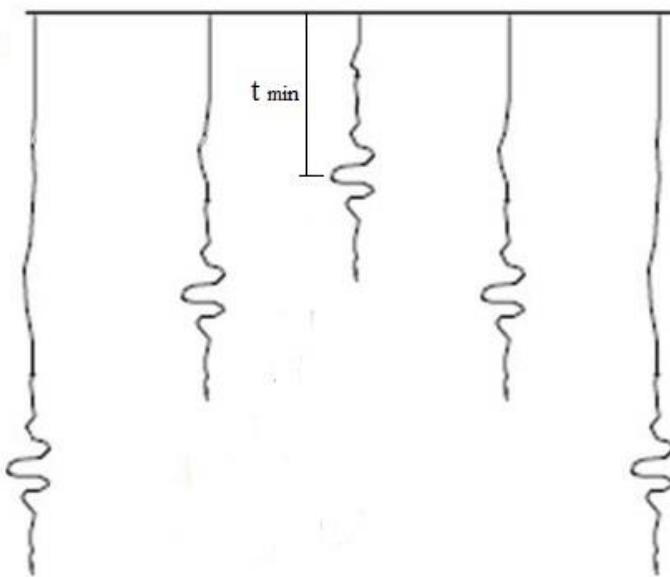


Рисунок 5.9 – Схема определения минимального времени прихода сигнала

Расчет относительной диэлектрической проницаемости среды

Расчет относительной диэлектрической проницаемости среды в программе осуществляется выбором параметра «Диэлектрической проницаемости». После ввода пользователем относительной диэлектрической проницаемости среды программа вычисляет относительную диэлектрическую проницаемость подповерхностной среды (рис. 5.10).

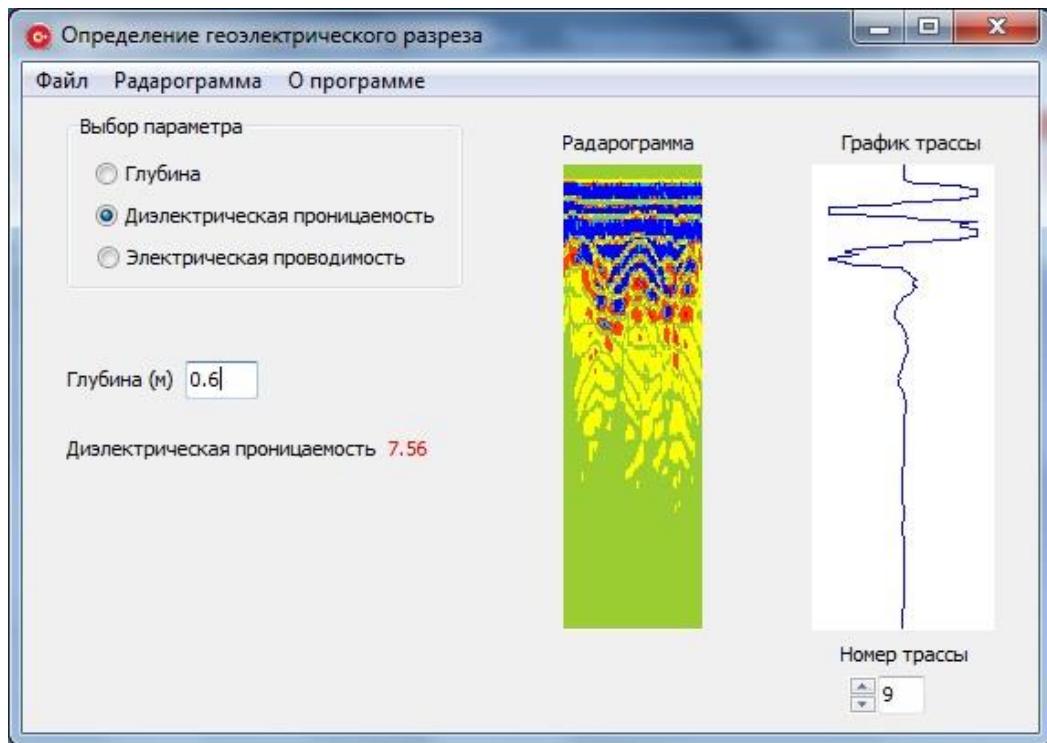


Рисунок 5.10 – Диалоговый экран расчета относительной диэлектрической проницаемости среды

При заданной глубине залегания подповерхностного объекта относительная диэлектрическая проницаемость среды вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{ct_{min}}{2h} \right)^2$$

Расчет электрической проводимости среды

Расчет электрической проводимости среды в программе осуществляется выбором параметра «Электрическая проводимость». После ввода пользователем значения относительной диэлектрической проницаемости среды и коэффициента затухания программа вычисляет электрическую проводимость подповерхностной среды (рис. 5.11).

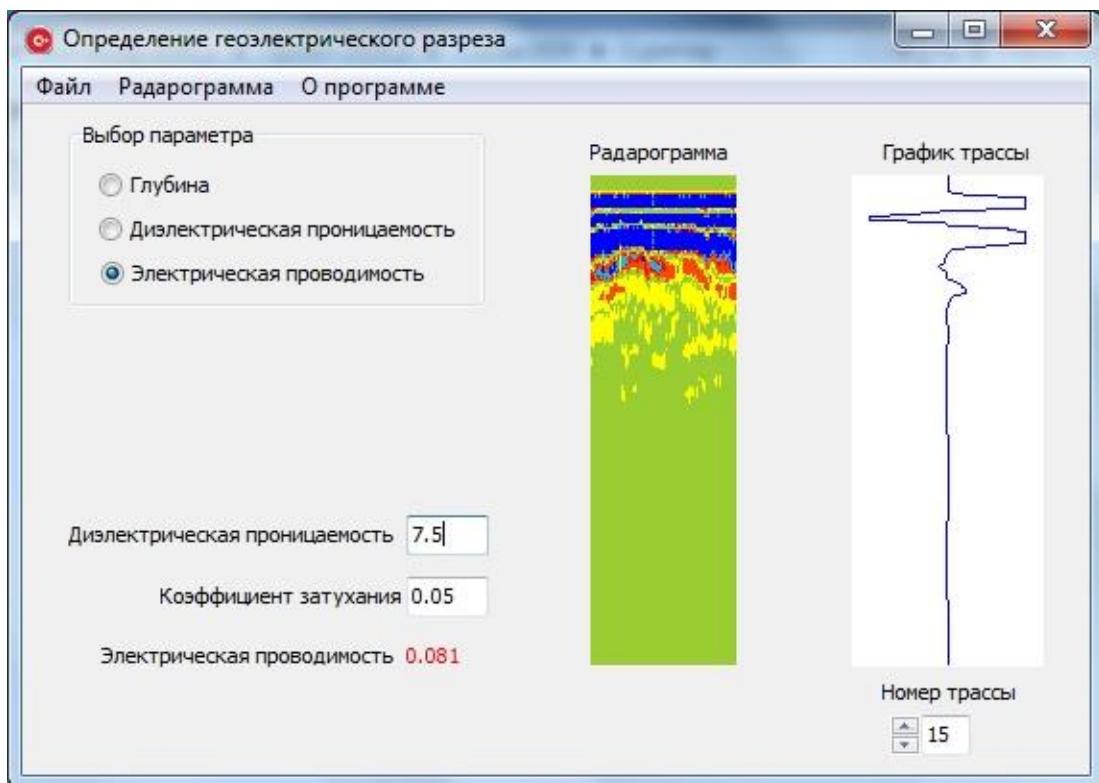


Рисунок 5.11 – Диалоговый экран расчета электрической проводимости среды

Электрическая проводимость σ , согласно [10], связана с относительной диэлектрической проницаемостью среды и затуханием электромагнитных волн следующим образом.

$$\sigma = \frac{\alpha \sqrt{\epsilon_r}}{1,69}$$

где α - коэффициент затухания радиоимпульса в подповерхностной среде.

Описание программы

Программа определения геоэлектрического разреза дополняет и улучшает интерпретацию результатов георадарных исследований с помощью фирменных ПО, поставляемых вместе с георадарами.

Функциональные возможности программы:

1. Ввод данных из файла радарограммы;
2. Визуализация профиля радарограммы;
3. Определение глубины залегания подповерхностного объекта;
4. Определение относительной диэлектрической проницаемости среды;

5. Определение электрической проводимости подповерхностной среды;
6. Сохранение профиля радарограммы в различных форматах.
7. Просмотр графика трассы радарограммы
8. Сохранение графика трассы радарограммы в различных форматах.

Относительная погрешность вычисления определяемых параметров геологического разреза находится в пределах 5 -8%.

На программу получена авторское свидетельство №9319 от 20.04.2020г. Программный комплекс разработан в среде Embarcadero RAD Studio C++ Builder XE5 [11].

5.3 Математические моделирования интерпретации радарограмм

В настоящее время бурно развивается иное направление интерпретации радарограмм, а именно математическое и компьютерное моделирование процесса распространения и отражения электромагнитных волн в среде. Радарограмма несет информации времени пробега до неоднородности, а на практике возникает интерес определить физические характеристики неоднородности, как функцию зависящей от глубины проникновения в среду. В случае отраженных электромагнитных сигналов к физическим характеристикам исследуемых объектов относятся: диэлектрическая и магнитная проницаемость, проводимость сред. Для определения этих коэффициентов широкое распространение получила теория некорректных и обратных задач, которое получило бурное развитие в 20-ом веке. Основа этой теории восходит от первых работ академика А.Н. Тихонова [12,13]. Для различного класса задач теория некорректных и обратных задач получило развитие в работах академиков Лаврентьева М.М., Иванова В.И. их учеников и последователей. Вопросы единственности и устойчивости в классе корректности для обратных задач математической физики изучены в монографии В.Г. Романова [14]. Теоретические основы и численные методы решения обратных задач для уравнения геоэлектрики изложены в монографии В.Г. Романова, С.И. Кабанихина [15]. Использование оптимизационных методов для решения коэффициентных обратных задач приведены в монографии С.И. Кабанихина и Исакова К.Т. [16]. Алгоритмы и численные методы решения некорректных задач используемых для широкого круга задач

геофизики изложены в коллективной монографии Исакова К.Т. и его коллег [17]. Вопросы качественного исследования обратных задач для дифференциальных уравнений приведено в книге К.Т. Исакова, В.Г. Романова и других [18].

В диссертационной работе Оралбековой Ж.О [19] (научный руководитель профессор Исаков К.Т.). изучены теоретические исследования и разработаны численные методы решения обратных коэффициентных задач для уравнения геоэлектрики и теории упругости. Рассмотрены модели распространения электромагнитных волн в горизонтально-слоистой среде во временной и частотной области и распространение упругих волн для горизонтально-слоистых сред в частотной области. В качестве апробации численных алгоритмов решения коэффициентных обратных задач проведены экспериментальные исследования по диагностике взлетно-посадочной полосы коммерческого аэродрома, расположенного на территории Алматинской области РК, с использованием георадара .

В диссертационной работе Шолпанбаева Б.Б [20] (научный руководитель профессор Исаков К.Т.). исследованы теоретические и практические методы решения задач электродинамики по определению электромагнитных свойств локализованных объектов. Разработаны численные методы решения задачи продолжения электромагнитного поля в сторону залегания локализованных объектов. Проведена апробация алгоритмов на данных экспериментальных исследований с георадаром Лоза-В.

Анализ технических характеристик распространенных георадаров и вопросы применения информационно-коммуникационных технологий в задачах интерпретации георадиолокационных данных отражены в коллективной монографии [18]. Как правило, для решения обратной коэффициентных задач необходимо наличие дополнительной информации, т.е. отклика среды в точке наблюдения. На практике используются данные георадара, а именно отраженные сигналы от неоднородностей сред, которые фиксируют приемник прибора. Таким образом, георадар фиксирует время пробега отраженных сигналов и далее, используя ее как дополнительную информацию, программное обеспечение (решение обратной задачи), позволяет определить геоэлектрический разрез.

5.3.1 Алгоритмы первичной обработки георадарных данных

Электромагнитные импульсы, возникающие в результате возбуждения передающей антенны генератором наносекундных импульсов, распространяются в зондируемой среде. Приемная антенна принимает данные сигналы, преобразует электромагнитный отклик в электрический сигнал. Полученный сигнал оцифровывается и передается в блок цифровой обработки (возможно компьютер), где проводится первичная обработка сигнала, запись во встроенную память для последующей обработки и визуализации.

Генераторная часть прибора обеспечивает возбуждение зондирующих импульсов в генераторной антенне на различных частотах.

Измерительная часть прибора обеспечивает регистрацию отраженных волн с приемной антенны, автоматическую временную регулировку усиления, стробирование и оцифровку сигнала.

В третьей главе приведены классические алгоритмы обработки сигналов для георадиолокационных систем на основе Фурье-преобразований. Семейство преобразований Фурье включает в себя: преобразование Фурье; ряды Фурье; дискретные ряды Фурье; дискретное преобразование Фурье; Быстрое преобразование Фурье.

Приведены обработки радарограмм цифровыми фильтрами Баттервортса и в целом процедура выполнения цифровой фильтрации на реальных данных георадара серии «Лоза-В».

Для решения прикладных задач необходимо иметь зависимость амплитуды сигнала от глубины его отражения, а исходная радарограмма выражает зависимость амплитуды сигнала от времени отражения. Затем необходимо избавиться от различных помех, скрывающих полезный сигнал.

С этой целью рассматриваются алгоритмы снижения уровня шума в радарограмме с использованием различных вейвлетов. Использовались: вейвлет Хаара и вейвлеты Добеши 4 - порядка. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени и неоднородных в пространстве. Результаты анализа должны содержать частотную характеристику сигнала распределение энергии сигнала по частотным составляющим. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье вейвлеты способны с более высокой точностью представлять локальные особенности сигналов.

Приводится модуль реализации алгоритмов первичной обработки георадарных данных и алгоритм программного модуля по определению глубины залегания и диэлектрической проницаемости объектов полигона.

В результате исследования подповерхностной среды, получим множество сигналов, полученных от приемной антенны для каждого измерения георадаром. Множество таких трасс визуализируется методом переменной плотности в виде изображения. Разработан программный модуль определения глубины залегания объектов и относительной диэлектрической проницаемости подповерхностной среды. Местоположения подповерхностного объекта определяется вершиной гиперболы построенного по точкам максимальных значений амплитуд каждой трассы.

5.3.2 Метод подбора для определения геоэлектрического разреза

В данном подразделе рассматривается численные методы решения прямых задач электродинамики в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Исходная задача электродинамики, в случае специального выбора источника электромагнитного возмущения, сведена к серии одномерных задач для уравнения геоэлектрики [2]. Обезразмерены входящие в уравнения геоэлектрики физические величины. В разделе приводятся алгоритмы для построения класса возможных вычисленных физических полей, для набора моделей геологического разреза в случае слоистых и вертикально-неоднородных сред. Вертикально-неоднородные среды, рассмотрены нами как случаи наклонных сред, а также комбинации наклонных и слоистых сред, т.е рассматриваются непрерывные (сглаженные среды). Для такого случая, нет разрывов коэффициентов физических характеристик сред, которые в случае разрывов, приводят к определенным трудностям при построении алгоритма решения прямой и тем более алгоритмов решения обратных задач, в последнем случае при построении градиента функционала невязки. На основе метода «подбора» фиксированные точки измерения для класса вычисленных физических полей определяет класс функций, описывающих отклик среды [3]. Из условия минимума квадратичного отклонения наблюдаемого поля (георадарные данные в фиксированной точке) и вычисленного физического поля, в силу теоремы единственности [4]

получаем искомую структуру среды, соответствующую данным георадара.

5.4 Подготовка объектов для проведения экспериментальных исследований

Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде, которая описывается системой уравнений Максвелла [21]. Различают постановки прямой и обратной задачи. Суть постановки прямой задачи, состоит в определении вектора напряженности электрического поля, по заданным геофизическим свойствам среды: диэлектрической и магнитной проницаемости; проводимости, а также источника возмущения. Постановка обратной задачи состоит, в определении геоэлектрического разреза, а именно физического состояния среды, по дополнительной информации. В качестве этой информации в задачах электромагнитной геофизики принимают отклик среды, а именно горизонтальную компоненту вектора электрической напряженности в точке наблюдения [21]. В связи с этим в начале, изучим постановку прямой задачи, на экспериментальном уровне, с применением георадиолокационного прибора, который и фиксирует отклик среды.

В первом разделе приведена методика моделирования источника, излучаемым источником георадара. С этой целью проведены экспериментальные исследования с помощью георадара «Лоза-В». Выбран участок песчаного карьера, однородной среды – речной песок, с известными геофизическими свойствами. Определены спектральные характеристики сигналов излучаемых приемной антенной, с разверткой: 0,5 м, 1 м, 1,5 м., 3 метра, на основе дискретных преобразований Фурье. Проведена интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по моделированию источника, излучаемых прибором «Лоза-В».

Описание объектов исследований (полигон ТОО «Бек», Алматы)

Для моделирования источника излучаемым георадаром Лоза-В, выбран участок песчаного карьера, с заранее известным геоэлектрическим разрезом. По данным георадара, а именно дополнительной информации впоследствии будет решена обратная задача по моделированию источника. Проведены эксперименты с применением различных антенн. Экспедиция в составе профессора

Евразийского национального университета имени Л.Н Гумилева Исакова К.Т. и старшего преподавателя Казахского национального педагогического университета имени Абая Шолпанбаева Б.Б., 4 января 2019 года провели экспериментальные исследования на песчаном карьере «ТОО Бек», находящейся в 30 км. от города Алматы по направлению в сторону В. Капчагая.

Задачи исследования: определение спектральных характеристик сигналов, излучаемых антеннами: 0.5 м, 1 м, 1.5 м., 3 метра; интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по восстановлению источника. Эксперимент №1. Использована антенна с разверткой 1.5 метра. На участке 25*100 (м) отмечено 7 трасс. По каждой трассе проведено 49 измерений с шагом шаг 0,2-0,25 (м). Расстояние между трассами 0,5 метра. На рисунке 5.12 а) отмечено 7 трасс и геофайлы обозначено как: А0-А6.на рисунке 5.12 б) процесс измерения. Для обработки геофайлов использована стандартная программа «Крот», встроенная в георадар «Лоза-В». Аналогичные измерения проведены с антенной разверткой: 1 (м) -Эксперимент №2.. Эксперимент №3. - измерения проведенные с антенной разверткой: 0,5 (м). Эксперимент №4. - измерения с антенной 3 м, с шагом 3 метра (см. рисунок 5.13 а).

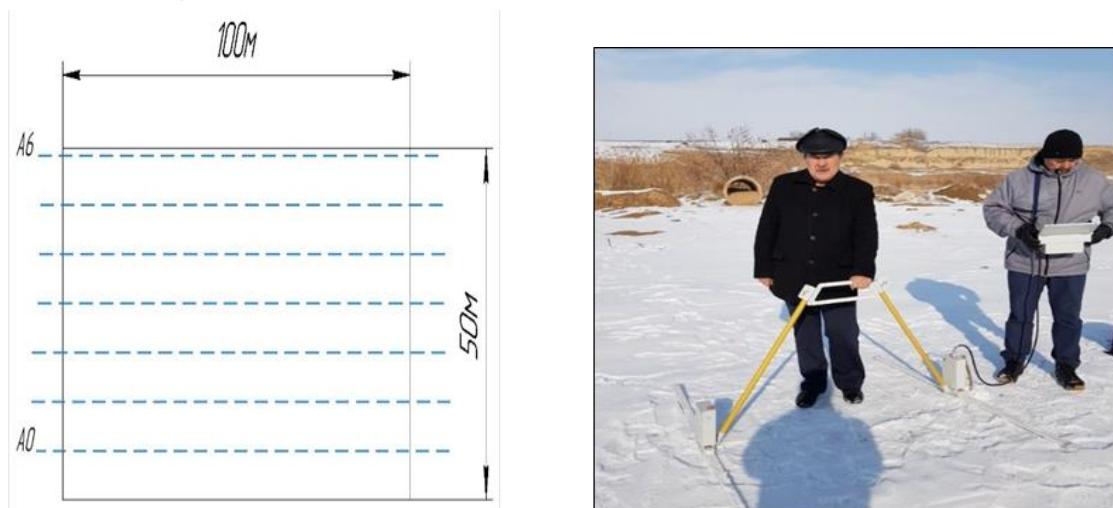


Рисунок 5.12 – а) Схема трасс. б) Измерения с прибором «Лоза-В». Члены экспедиции: Исаков К.Т., Шолпанбаев Б.Б.



а)



б)

Рисунок 5.13 – Измерения к эксперимента №4, №5. а) Измерения антенной с разверткой – 3 (м). б) Измерения на холме антенной с разверткой – 0,5 (м)

На рисунке 5.13 б) в качестве доказательства, что эксперименты проведены в однородной среды, выбран участок, где отчетливо виден срез среды – однородный песок. На этом холме, проведены измерения по трем трассам антенной с разверткой 0,5 метра.

Список использованных источников к Разделу 5:

1. Мухамбетжанов С.Т. Об одном приближенном методе решения задач неравновесной фильтрации // Вестник КазНПУ. Серия «физико-математические науки». – 2007. - №2(18). – С. 180-186.
2. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
3. Владов М.Л. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований / М.Л. Владов, В.П. Золотарев, А.В. Старовойтов. – М. : GDS Production, 1997. – 66 с.
4. Стоянович Г.М. Опыт комплексного геофизического обследования объектов железнодорожной инфраструктуры / В.М. Стоянович, В.В. Пу-патенко, Ю.А. Сухобок // Современные технологии. Анализ. Моделирование. – 2012. – № 1. – С. 283–288.
5. Сухобок Ю.А. Применение скоростного анализа для построения модели многослойной грунтовой среды по данным георадиолокации / Ю.А. Сухобок, М.В. Абанин, В.В. Пупатенко // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования : тр. Всероссийской молодежной научно-практической

конференции (10–13 апреля 2012 го-да) : В 3 т. / под ред. Б.Е. Дынькина, А.Ф. Серенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – Т. 1. – С. 154–159.

6. Сухобок, Ю.А. Построение глубинного разреза сильно дифференцируемой по скорости среды при обследовании транспортных сооруже-ний методом георадиолокации / Ю.А. Сухобок, В.В. Пупатенко // Наука университета – новации производства: тр. Всерос. науч.-практ. конфе-ренции ученых транспортных вузов, инженерных работников и предста-вителей академической науки (посвящена 75-летию ДВГУПС) 10–12 ок-тября 2012 В. / под ред. Б.Е. Дынькина и А.Ф. Серенко. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – С. 60–64.

7. Tzanis A. MATGPR: A freeware MATLAB package for the analysis of common-offset GPR data. – Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 09488, 2006.

8. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Re-view / J.A. Huisman, S.S. Hubbard, J.D. Redman & A.P. Annan. – Vadose Zone, Vol. 2, 2003, p. 476–491.

9. Harry M. Jol. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science, 2009. – 402 p.

10. Wightman W.E., Jalinoos F., Sirles F., Hanna K. Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division, Lakewood, CO, Publication No.FHWA-IF-04-021, 2003.

11. Токсейт Д.К., Исаков К.Т., Боранбаев С.А. Свидетельство о внесении сведений в государственных реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом на тему «Интерпретация радарограмм геологического разреза на основе экспериментальных расчетных формул» №9319 от 20 апреля 2020 года.

12. Тихонов А.Н., Арсений В.Я. Методы решения некорректных задач. //М.: Наука, 1979 - 285 с.

13. Тихонов А.Н., Шахсуваров Д.Н., Метод расчета электромагнитных полей, возбуждаемых переменным током в слоистых средах // Известия АН СССР, сер. Геофизическая, 1956, № 3, с. 251-254.

14. Романов В.Г. Обратные задачи математической физики. //М.: Наука, 1984 - 264 с.

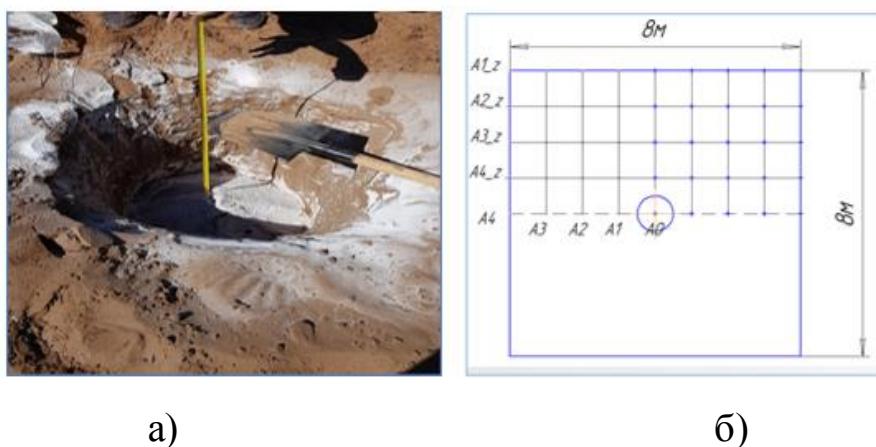
15. Романов В.Г., Кабанихин С.И., Обратные задачи геоэлектрики. /М.Наука. 1991 -304 с.

16. Кабанихин С.И., Исаков К.Т. Оптимизационный метод решения коэффициентных обратных задач. Новосибирск. Издательство НГУ. 2001, 316с.
17. К.Т. Исаков, С.А. Боранбаев, Н. Ұзаққызы и.др. Научно-технические основы для разработки систем георадиолокации: монография / – Астана: ЕНУ, 2017. – 222 с.
18. К.Т. Исакова, В.Г. Романова. Монография.
19. Оралбекова Ж.О. Эффективные оптимизационные методы решения обратных задач для горизонтально-слоистых сред.
20. Kanguzhin B.E. Restoration of tape matrices with the help of the spectral date // J.Inv.Ill-Posed Problems -2010.- №18. - P. 389 - 400.
21. S.I. Kabanikhin, O. Scherzer, M. A. Shishlenin. Iteration methods for solving a two dimensional inverse problem for a hyperbolic equation. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems.(2003). Vol. 11, No. 1. Pp. 87–109.

Приложение А. Экспериментальные измерения георадаром Лоза-В

Раздел 1. Результаты измерений экспериментов

Объект №2. «Купол соли». Глубина объекта 0,6 м. диаметр 0,67 м, высота купола 0.35-0.40 м, (вес купола соли – 50кг), см.рисунок 1.1а. Площадь участка 8м×8м. Расстояние проведены измерениями 50 см антенной с шагом 1 м, между профилями 1 м. Вначале источник находится в точке А0, а приемник измерил все остальные точки, в том числе и в точке А0. Потом источник перемещали с точки В до точки К и провели измерения как в точке А0, см. Рисунок А.1.1 (б). Файлы названы А3, А2, А1, А0, А1_Z, А2_Z, А3_Z, А4_Z.



а)

б)

Рисунок А.1.1 - а) Мишень – купол соли. б) Схема измерений №2

На рисунке А.1.2 показана обработанная радарограмма в программе «Python» результатов эксперимента с использованием антенны 50 (см).

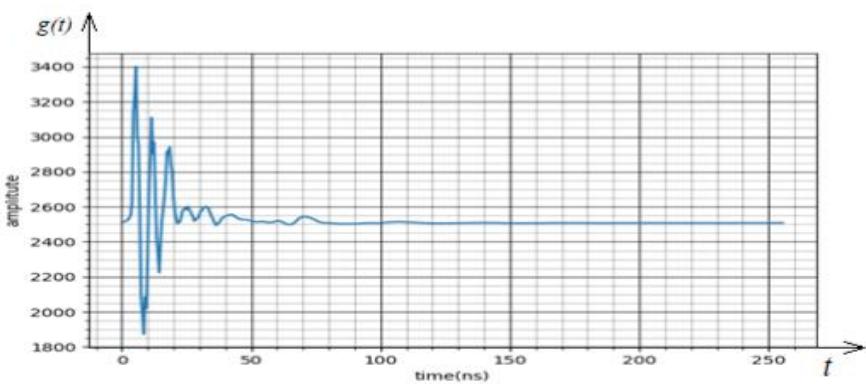


Рисунок А.1.2 - График радарограммы объекта № 2

Объект №3. «Купол соли» (в центре окружности с $R=4$). В центр источника закопан 50 кг чистой соли, источник находится в центре, приемник будет двигаться по радиусу окружности $R= 4$ метра.

Здесь 16 лучей, $R=4\text{м}$, $r_1=1\text{м}$, $r_2=2\text{м}$, $r_3=3\text{м}$, $r_4=4\text{м}$. Измеряем каждый луч с шагом 1 метр. $B0$ – один файл. $B0$ – 64 кадров, см. Рисунок А.1.3(а). На рисунке А.1.3(б) показана обработанная радарограмма в программе «Python» результатов эксперимента с использованием антенны 50 см.

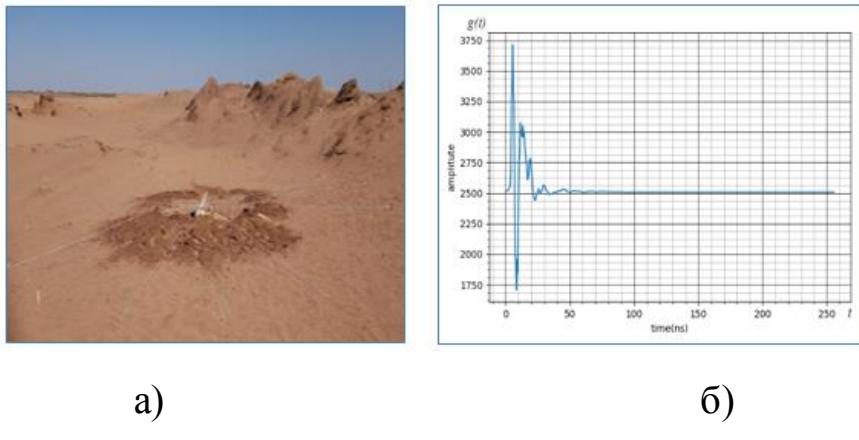


Рисунок А.1.3 – а) Объект №3 «Купол соли» (в центре окружности с $R=4$).
б) График радарограммы объекта № 3

Объект №4. «Соляной купол» (на глубине 1 м). Залив соляным раствором. 1 (одна труба), см. Рисунок А.1.4.

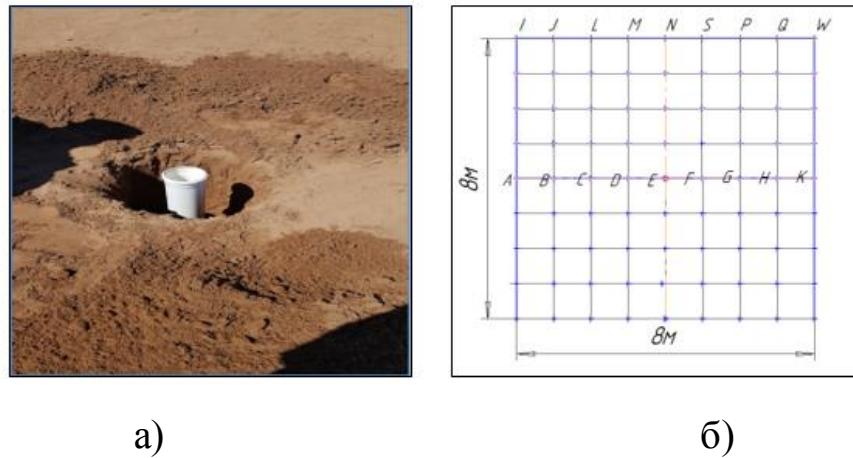


Рисунок А.1.4 – а) Объект №4 «Соляной купол». б) Схема измерений объекта №1

В центре в (·) Е расположена труба длиной в 1 м перпендикулярно вниз. Затем в эту трубу заливаем соляный раствор (36%) в объеме 50 литров. Диаметр трубы 10 см. на глубине 1 м от поверхности образуется соляной купол, в однородной среде: речной песок.

Общая схема измерений: Проведено площадное измерение 50 см. источник располагали в точках: $A, B, C, D, E, F, G, H, K$ а антенну располагали в точках помеченных кружком, Рисунок А.1.4(б).

1 шаг. Первое измерение провели следующим образом. Источник располагали в $(\cdot) A$, а антенну перемещали вдоль линии (IA) с шагом 1 метр сверху вниз. Расположение антенны отмечено кружками, затем источник также остается на месте, т.е. в $(\cdot) A$, а антенну перемещаем вдоль линии (JB) сверху вниз с шагом 1м, таким образом чтобы индикатор на антенне и индикатор на источнике строго были на одной линии. В противном случае сигнал не фиксируется прибором. Аналогично при неподвижном расположении источника в $(\cdot) A$, для других измерений антенну перемещаем вдоль линий (LC), (MD), (NE), (SF), (PG), (QH), (WK). Также заканчивается площадное измерение относительно неподвижного источника расположенного в $(\cdot) A$.

2 шаг. Второе площадное измерение, проводим следующим образом, перемещаем источник в точку В, и фиксируем все сигналы полученных π перемещение антенны вдоль линий: (IA), (JB), (LC), (MD), (NE), (SF), (QH), (WK) и т.д.

8 шаг. Расположим источник в $(\cdot) K$, и фиксируем все сигналы перемещая антенну вдоль линий (WK), (QH), (PG), (SF), (NE), (MD), (LC), (JB), (IA).

Г0-Г3. Г3 (36 кадров). Г4 – не было снято.

На рисунке Е.1.5 показана обработанная радарограмма в программе «Python» результатов эксперимента с использованием антенны 50 см.

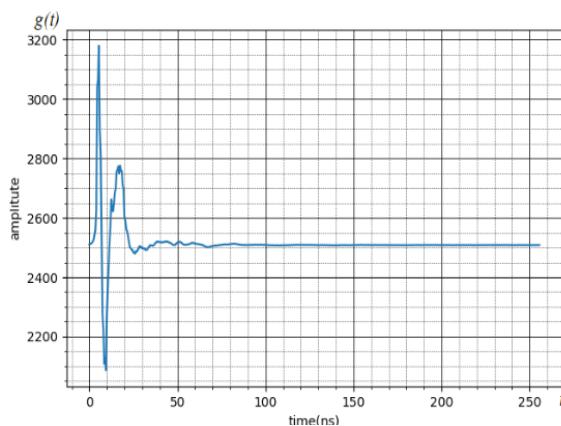


Рисунок А.1.5 - График радарограммы объекта № 4

Объект №5. «Два соляных купола» (на глубине 1 м). Два соленных раствора на глубине 1 м. ВВ3 – 40 кадров. ВВ1-ВВ2 – 45 кадров.

Два соленных купола образованных от заливки соляных растворов воды (36%) в трубы, расположенных друг от друга на расстояние 1.5 метра.

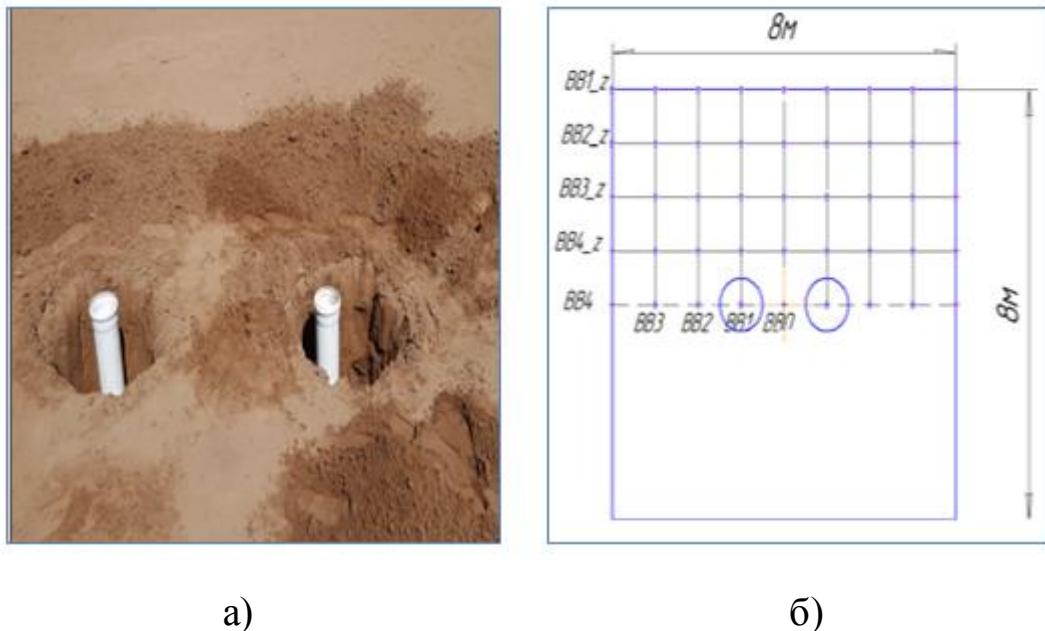


Рисунок А.1.6 – а) Объект №5 «Два соляных купола». б) Схема измерений объекта №5

На рисунке А.1.7 показана обработанная радарограмма в программе «Python» результатов эксперимента с использованием антенны 50 см.

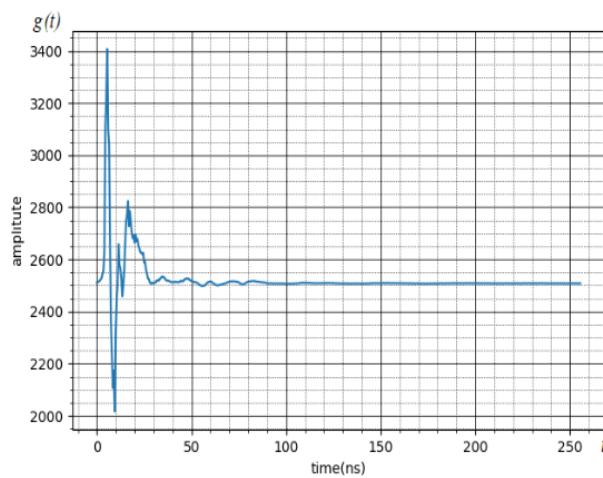


Рисунок А.1.7 - График радарограммы объекта №5

Раздел 2. Отклики сред, полученных по измерениям экспериментов

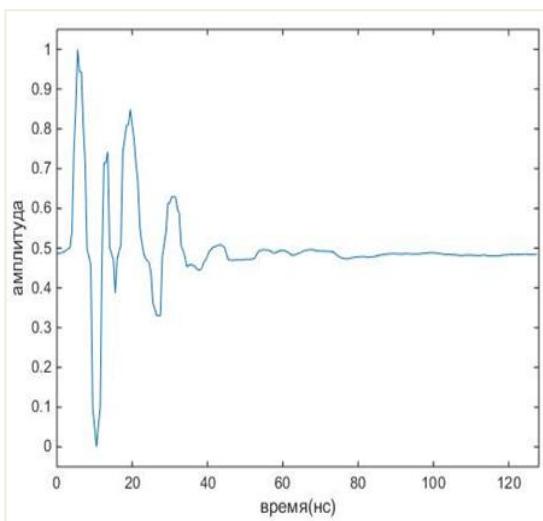


Рисунок А.2.1 - График трассы радаограммы.

Отклик среды в результате эксперимента № 2 (Антенна расположена от источника на расстоянии – 2 метра)

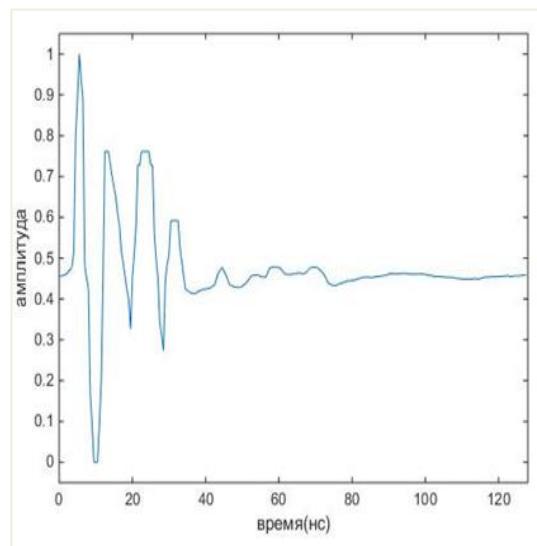


Рисунок А.2.2 - График трассы радаограммы. Отклик среды в результате эксперимента

№ 3 (Антенна расположена от источника на расстоянии – 3 метра)

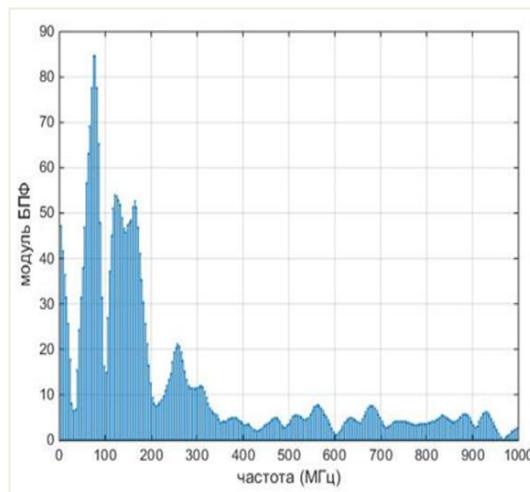


Рисунок А.2.3 - Спектр трассы радаограммы, по данным эксперимента № 2 (антенна расположена на расстоянии 2 метра)

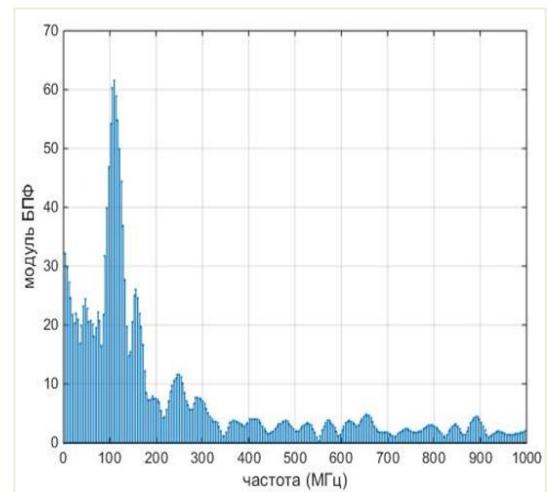


Рисунок А.2.4 - Спектр трассы радаограммы, по данным эксперимента №3 (антенна расположена на расстоянии – 3 метра)

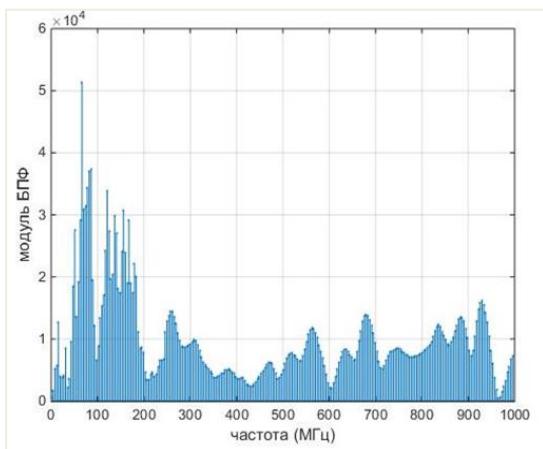


Рисунок А.2.5 - График спектра источника сигнала, для эксперимента №2 (Антенна расположена на расстоянии от источника – 2 метра)

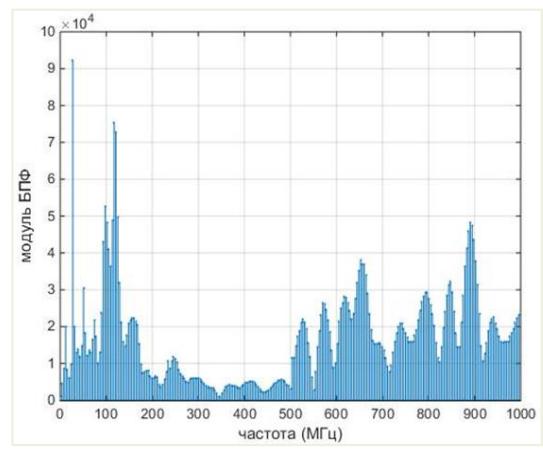


Рисунок А.2.6 - График спектра источника сигнала, для эксперимента №2 (Антенна находится на расстоянии от источника – 3 метра)

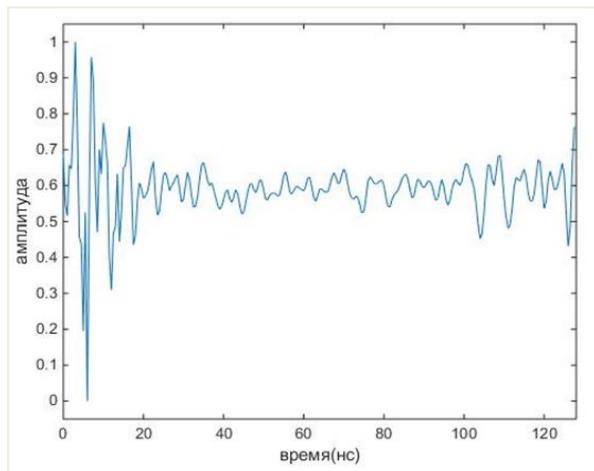


Рисунок А.2.7 - График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента №2

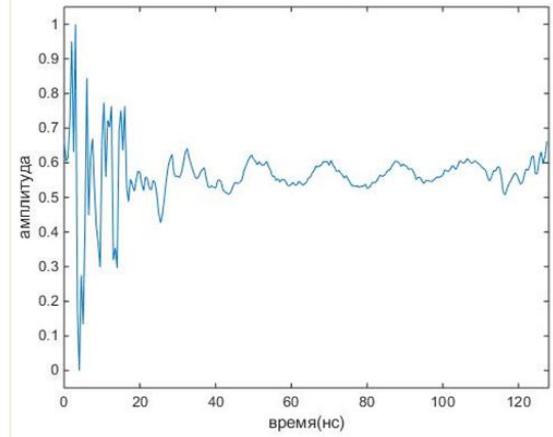


Рисунок А.2.8 - График восстановленного источника сигнала, по данным эксперимента №3

Приложение Б. Экспериментальные исследования определения магнитной восприимчивости

Раздел 1. Топографическая схема измерений.

Для оценки целесообразности и эффективности исследования первоначально была проведена серия экспериментов в городской черте (рисунок Б.1.1) и за ее пределами (пригородное село Талапкер) на разных глубинах погружения зонда до 3 метров (рисунок Б.1.2)

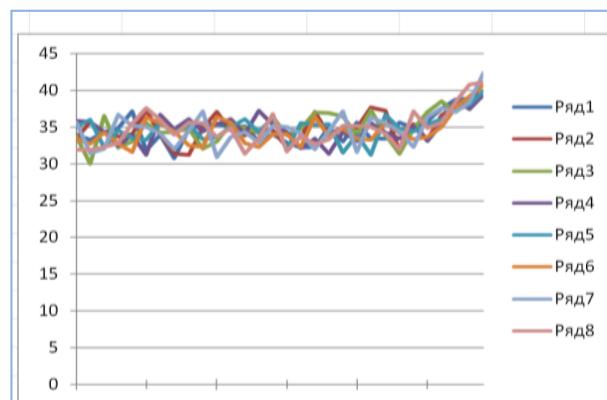


Рисунок Б.1.1 - Измерения магнитной восприимчивости в городской черте

Магнитная восприимчивость почв зависит от состава, размера зерна магнитных минералов и их источников, а также от методов их измерения. Измерения, проведенные в слабом переменном магнитном поле являются наиболее надежными.

Анализ данных показывает тенденцию роста магнитной восприимчивости, а значит и содержания тяжелых металлов в грунте по мере приближения к поверхности земли. В связи с этим все последующие измерения были проведены на глубине до 1 метра с использованием логарифмической шкалы по глубине с учащением измерения по мере приближения к поверхности земли.

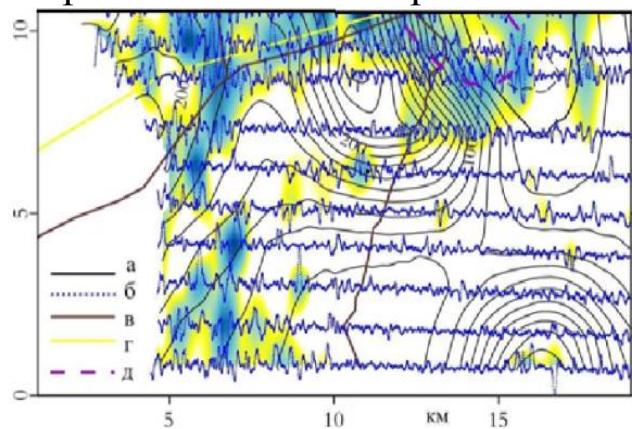


Рисунок Б.1.2 - Карта магнитного поля пригородного участка (село Талапкер) и выявленные микромагнитные аномалии:

- а – изолинии аномального магнитного поля;
- б – остаточные локальные аномалии вдоль профилей измерения;
- в – шоссе и грунтовые дороги;
- г – линия электропередач;
- д – контур, объединяющий расположение наибольших магнитных аномалий.

Анализ результатов графической интерпретации магнитного поля пригородного участка (село Талапкер) и выявленные микромагнитные аномалии позволили наблюдать корреляцию микромагнитных аномалий с транспортными линиями.

Все полученные значения магнитной восприимчивости почв в районах расположения промышленных предприятий в Астане превышают естественный фоновой показатель в некоторых местах до 5 раз. Кроме того, по сравнению с данными исследований величины магнитной восприимчивости, полученные нами в прошлые годы, наблюдается его заметный рост. Данные магнитной съемки были значительно «зашумлены» аномалиями от приповерхностных источников. С помощью процедуры фильтрации аномалий по Калману удалось снизить влияние таких помех.

Полевые исследования на территории Акмолинской области (Республика Казахстан) были выполнены в магнитоспокойные дни в различное время суток. На рисунке Б.1.3 приведена топографическая сетка проведения измерений. Большое количество равноточных корректных измерений (несколько замеров на каждой скважине для каждой глубины) обеспечили статистическую достоверность получаемых результатов.

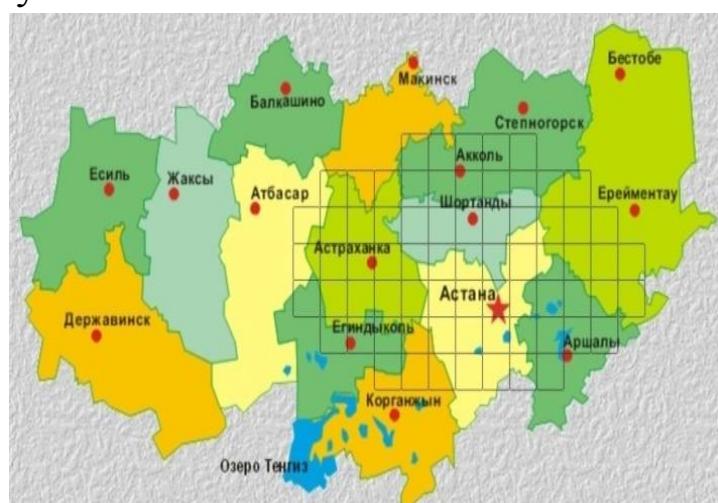


Рисунок Б.1.3 - Топографическая сетка проведения измерений на территории Акмолинской области (Республика Казахстан)

На рисунке Б.1.4 приведены результаты визуализации измерений магнитной восприимчивости почвы с глубины 5 см, для сглаживания данных по глубине и точкам измерения был использован кубический сплайн.

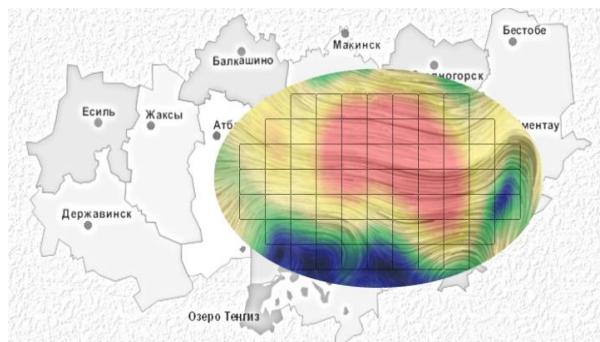


Рисунок Б.1.4 - Визуализация результатов измерений магнитной восприимчивости территории города с использованием различных методов исследований

Раздел 2. Значение магнитной восприимчивости почв в районах расположения опытных полигонов в Акмолинской области РК

Таблица Б.1 - Полигон 1

Ном ер поли гона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ 10-5 ед. СИ (min/ma x)
1	зола с ТЭЦ	6	50-500	$59,6 \pm 14,7$	81,3/110, 7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	60,3 597 8	58,1 334 1	58,48 159	56,71 244	60,5 294 4	58,9 499 7	59,26 296	57,9 7672	62,86 157	58,34 756
Точка 2	63,3 060 1	60,6 913	56,86 05	61,65 755	58,5 740 8	63,7 954 3	59,87 71	60,6 337	61,14 834	63,54 647
Точка 3	62,9 883 4	58,2 873 1	60,53 467	57,39 444	63,4 335 2	56,6 873 4	60,63 369	57,8 6541	61,42 13	61,45 602

Точка 4	59,1 536 8	57,0 273 5	61,18 806	56,98 808	57,6 007	60,8 187 3	61,71 69	59,5 9093	56,76 718	56,82 34
Точка 5	58,8 654	59,6 376 1	57,62 482	62,10 578	58,3 141 8	56,7 117 5	61,78 19	60,3 4844	60,64 078	56,69 312
Точка 6	57,3 241 3	61,6 700 3	60,66 295	57,86 742	58,3 190 8	60,4 650 1	63,00 209	63,5 4493	63,80 185	59,73 853

Таблица Б.2 - Полигон 2

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
2	чернозем	6	50-500	$30,0 \pm 5,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	31,64 688	32,8 0471	30,06 430	30,17 054	35,95 853	30,08 488	31,05 632	31,0 539	31,39 367	33,9 9151
Точка 2	33,07 217	34,9 8260	31,95 810	32,47 004	34,67 569	32,75 993	31,39 136	34,0 648 2	31,01 456	33,0 0826
Точка 3	35,29 638	31,5 7084	32,05 978	32,78 721	31,28 104	30,65 987	33,86 988	33,6 718 4	33,59 756	35,4 2447
Точка 4	35,68 022	32,1 0522	34,78 085	30,41 244	32,17 216	30,56 057	33,92 204	35,8 349 5	33,63 638	33,3 5393
Точка 5	30,61 726	31,0 9405	31,46 304	33,36 174	35,45 751	35,23 624	30,51 578	31,6 734 2	34,81 54	34,9 5333
Точка 6	34,11 878	30,3 0918	30,66 755	32,09 388	32,80 249	33,48 947	34,65 223	35,5 893	31,26 485	32,3 542

Таблица Б.3 - Полигон 3

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
----------------	------------	-----------------	----------------------	--	-----------------------------------

3	песчаный	6	50-500	42,1±4,7	81,3/110,7
---	----------	---	--------	----------	------------

Глу бин а см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	45,9 8177	42,15 582	42,4 6171	44,73 864	46,6 2917	46,94 120	46,8 5924	42,8 671	45,1 8096	45,8 7645
Точ ка 2	45,4 6588	43,03 23	45,4 1020	44,29 514	46,3 7984	44,72 038	46,8 6125	43,4 546 3	45,7 5566	43,4 4172
Точ ка 3	43,9 0470	45,75 759	46,2 8234	43,76 981	46,6 6096	46,90 836	44,9 0067	44,0 646 4	45,7 8476	42,3 455
Точ ка 4	42,1 5985	44,64 563	45,1 3354	44,92 209	42,7 467	45,03 969	43,2 0391	43,9 909 0	43,9 1711	43,6 1127
Точ ка 5	43,5 5022	44,33 259	42,8 3116	43,68 415	43,1 2313	46,42 321	46,2 8902	45,3 230 1	45,0 912	42,5 7327
Точ ка 6	42,7 3851	44,78 563	42,0 0541	46,62 828	46,8 9951	45,44 407	47,6 0056	45,2 226	43,3 1147	46,7 2521

Таблица Б.4 - Полигон 4

Номер полиго на	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi^* 10^{-5}$ ед. СИ (min/ma x)
4	торфянной	6	50-500	48,0±7,7

Глу бин а см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	50,67 044	52,15 709	51,8 8994	51,19 971	53,2 4515	48,96 087	51,8 4394	50,1 295	50,4 6573	49,5 3597
Точ ка 2	50,54 634	49,08 763	55,1 1417	49,95 226	48,2 5107	52,57 983	51,1 5345	54,3 902 5	54,9 1485	48,1 1895

Точ ка 3	51,01 262	49,14 142	49,1 8161	54,71 139	53,7 8012	49,58 123	50,2 713	49,0 590 7	49,8 6957	53,7 6217
Точ ка 4	50,40 05	49,07 222	49,7 2975	51,02 771	48,0 7805	51,92 761	50,5 4437	55,3 513 1	54,5 4443	53,0 7488
Точ ка 5	52,23 077	52,87 806	50,1 2006	53,49 533	49,9 8077	54,92 765	51,9 5395	55,7 391	51,5 9896	51,4 5848
Точ ка 6	50,41 089	54,64 757	49,6 1109	53,37 331	49,6 7209	49,18 587	50,6 1509	49,1 367 0	49,0 1238	53,6 4972

Таблица Б.5 - Полигон 5

Номер полигона		Тип грунта		Число измерений		Глубина измерения см		$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$		$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
5		зола котельная		6		50-500		59,1 \pm 7,6		81,3/110,7
Глу бин а см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	63,38 649	59,1 6605	64,76 744	59,53 165	61,37 532	64,26 225	61,97 503	63,9 318 2	62,21 196	60,7 4504
Точ ка 2	59,49 067	59,2 2703	61,21 661	59,68 714	65,76 477	65,08 596	61,26 299	59,1 725 2	61,56 043	60,3 4012
Точ ка 3	64,83 149	64,9 3913	59,44 071	59,11 531	60,17 739	60,25 758	61,81 305	62,4 301 3	62,69 002	59,4 2013
Точ ка 4	63,37 725	65,0 2177	62,58 341	65,50 707	63,81 004	62,03 494	65,53 966	64,0 327 2	60,31 603	60,5 6247
Точ ка 5	61,06 436	63,2 7407	59,66 102	59,87 578	63,31 349	61,36 412	59,63 656	64,4 977 3	59,36 084	60,3 9201
Точ ка 6	59,22 144	60,5 2585	60,27 119	65,85 875	61,63 847	59,79 778	64,36 084	63,5 628 0	59,33 168	62,0 4384

Таблица Б.6 - Полигон 6

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
6	зола бытовая	6	50-500	$48,6 \pm 14,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	51,70 445	54,1 656	50,99 905	52,30 948	49,10 831	52,02 267	53,62 122	50,4 3745	51,76 503	51,0 358
Точка 2	50,78 461	54,3 453	54,54 529	49,66 437	50,72 544	55,41 272	49,58 758	54,3 2991	50,48 376	50,2 2719
Точка 3	52,29 864	53,9 924	53,41 647	50,51 935	52,04 644	55,64 304	54,95 118	54,7 8405	50,92 461	49,4 7398
Точка 4	52,54 937	49,3 009	50,35 085	54,23 223	51,73 884	52,72 315	53,84 587	53,1 2494	54,11 824	53,2 4923
Точка 5	55,51 956	53,5 778	51,44 153	53,83 895	55,10 369	51,29 068	49,43 061	50,4 4644	55,81 832	53,0 7261
Точка 6	48,91 939	49,1 897	51,72 647	51,52 622	50,17 755	49,26 691	51,04 482	52,1 3083	49,70 814	51,0 9163

Таблица Б.7 - Полигон 7

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
7	песчаный	6	50-500	$36,0 \pm 10,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500

Точка 1	43,2 2836	45,31 432	45,4 1398	44,99 086	38,3 1654	42,3 863	37,2 0299	38,6 9518	38,0 2437	42,8 9611
Точка 2	43,5 157	37,65 754	43,0 9846	42,29 289	38,4 5721	37,6 1736	36,9 6963	42,1 7574	45,3 6835	39,8 4184
Точка 3	38,9 7317	38,52 29	44,6 615	45,72 99	43,7 0234	45,0 8926	36,9 419	41,1 7428	45,2 3695	37,8 9569
Точка 4	37,1 5171	40,84 841	43,0 2884	39,91 937	41,9 39	39,4 8844	44,0 8545	39,2 99	38,5 2737	40,0 1884
Точка 5	40,5 0608	36,07 543	39,6 8795	44,15 275	38,3 1034	37,7 3977	45,1 0609	42,7 6355	38,6 6013	45,1 9448
Точка 6	52,8 9667	46,32 158	50,5 2806	53,85 113	47,8 4654	48,0 732	46,0 8601	44,8 0399	52,9 1743	43,0 945

Таблица Б.8 - Полигон 8

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
8	щебенка	6	50-500	$59,6 \pm 14,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	58,04 374	56,7 914	61,83 936	57,34 598	64,52 586	57,95 374	63,73 068	60,8 4765	55,12 885	58,9 699
Точка 2	61,76 891	62,1 011 5	65,43 943	65,22 466	60,71 037	59,55 647	55,85 701	65,3 2954	64,57 24	65,0 9842
Точка 3	57,52 794	55,0 993 6	57,21 033	55,14 128	58,65 714	57,08 278	64,92 96	60,7 034	62,80 059	62,4 1914
Точка 4	61,36 54	55,1 998 9	64,76 534	65,56 615	55,55 503	59,11 996	56,86 172	63,2 2361	62,52 544	59,2 0882
Точка 5	62,01 689	56,4 188 3	64,99 323	61,00 799	57,09 268	63,08 474	56,58 052	57,5 1647	64,90 475	55,3 6301
Точка 6	64,29 466	58,3 154 3	60,25 323	61,12 384	65,15 14	63,84 685	62,42 195	60,6 032	59,60 695	59,4 5707

Таблица Б.9 - Полигон 9

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
9	чернозем	6	50-500	$30,6 \pm 9,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Точка 1	33,71 659	30,9 8483	35,61 016	33,17 467	32,45 399	31,38 158	30,57 558	34,9 694 6	33,52 733	35,2 3719
Точка 2	32,84 061	35,2 1573	33,09 698	32,26 183	33,28 387	30,76 488	31,81 571	30,2 358 6	35,96 439	34,2 3267
Точка 3	31,43 826	35,0 2810	32,32 093	31,27 320	34,74 219	32,95 781	30,96 896	33,8 071 5	30,50 324	33,7 8627
Точка 4	34,11 878	30,3 0918	30,66 755	32,09 388	32,80 249	33,48 947	34,65 223	35,5 893 8	31,26 485	32,3 5420
Точка 5	30,62 365	32,8 5015	35,92 837	35,98 859	31,26 512	32,74 158	33,05 596	34,6 090 0	33,48 094	32,2 1603
Точка 6	30,68 257	30,8 4077	35,70 865	30,38 745	32,67 928	34,64 567	32,86 814	31,7 690 5	34,72 900	32,5 8423

Таблица Б.10 - Полигон 10

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
10	щебенка	6	50-500	$58,2 \pm 10,2$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	63,59 421	64,0 418	59,82 882	65,53 562	59,64 245	63,62 861	64,67 218	64,0 3256	62,75 735	61,1 5723
Точка 2	65,35 254	64,2 944	59,55 0	63,40 943	62,26 253	64,84 953	64,71 288	65,5 470	64,50 7339	63,3 546
Точка 3	60,20 466	63,1 717	61,33 2	64,26 742	58,67 351	58,25 636	64,00 404	59,6 630	63,83 7355	61,1 846
Точка 4	63,91 177	62,2 207	64,43 2	59,88 520	63,74 634	59,81 729	61,07 531	59,1 447	61,38 5975	62,8 447
Точка 5	63,03 204	63,6 993	58,36 9	63,49 633	59,03 985	63,10 446	63,89 184	65,8 107	62,74 9088	60,9 182
Точка 6	59,81 211	61,0 522	64,69 0	59,22 252	60,69 635	62,77 224	59,01 307	59,9 382	58,69 1851	65,0 125

Таблица Б.11 - Полигон 11

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
11	глинозем	6	50-500	$43,1 \pm 9,5$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500

Точ ка 1	47,23 672	50,0 2432	49,13 997	47,20 618	50,08 304	48,39 763	49,68 200	48,8 218	46,12 431	50,0 9376
Точ ка 2	47,12 325	45,8 0423	43,18 080	43,30 464	50,62 934	47,02 529	45,76 377	45,8 067 8	44,29 692	50,3 9370
Точ ка 3	44,46 131	47,4 6208	47,37 883	50,28 074	44,27 838	43,88 992	50,38 215	47,9 544 1	46,47 023	48,0 2906
Точ ка 4	49,70 238	48,3 3852	49,06 944	43,36 666	44,17 119	47,90 039	47,55 605	46,0 612 5	46,67 382	47,3 8366
Точ ка 5	46,72 407	46,6 0047	43,18 512	48,08 741	44,62 981	50,65 492	50,61 476	45,7 049 3	44,58 191	44,2 7593
Точ ка 6	44,89 708	47,9 3132	46,50 667	44,47 379	45,91 612	49,03 655	44,07 139	43,1 149 0	50,57 063	46,3 1040

Таблица Б.12 - Полигон 12

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
12	песчаный	6	50-500	$36,0 \pm 9,8$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	38,6 9228	41,33 501	45,5 0220	38,07 201	39,3 4336	44,67 395	39,5 4160	38,8 317	43,2 2785	36,9 9579
Точ ка 2	40,9 3261	37,35 855	40,9 3582	40,37 857	42,1 5727	41,04 394	36,5 2640	36,0 051	36,9 6444	44,6 3637
Точ ка 3	39,6 7026	42,05 089	40,0 4146	36,44 160	44,6 6347	38,00 160	40,5 0229	45,8 214	36,0 0	38,5 5738
Точ ка 4	40,3 4357	37,35 273	42,9 1985	41,46 907	42,8 3184	45,08 073	45,3 9007	36,2 359	39,3 7910	39,6 7043

Точ ка 5	42,0 2271	42,03 888	36,0 0413	42,53 937	43,4 8814	40,00 321	39,5 5601	38,0 933 1	39,0 5661	42,1 5243
Точ ка 6	41,1 9869	44,17 571	45,4 2785	42,68 655	36,5 4044	40,64 120	44,6 3718	44,3 517 6	39,3 0467	39,4 6016

Таблица Б.13 - Полигон 13

Номер полигон а	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi^* 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi^* 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
13	глинозем	6	50-500	55,0 \pm 8,5	81,3/110,7

Глу бина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	60,16 317	56,2 9224	62,60 884	58,08 739	60,10 794	58,76 275	62,97 538	56,3 271 2	58,39 958	59,3 6951
Точ ка 2	55,00 824	62,0 7948	58,32 875	56,26 836	60,60 046	60,12 787	59,47 401	58,9 343 5	60,67 329	60,6 8736
Точ ка 3	56,95 592	60,2 8977	55,91 662	56,94 915	55,12 523	59,33 929	57,31 085	59,2 076 2	60,64 012	60,8 1059
Точ ка 4	56,71 809	56,4 3574	60,81 013	55,33 641	58,49 608	59,61 857	59,77 221	56,4 676 1	62,04 097	61,7 8805
Точ ка 5	56,00 399	56,9 1759	56,32 126	57,82 096	59,24 552	60,99 575	57,03 245	57,1 304 2	61,41 879	56,6 0347
Точ ка 6	61,11 776	61,7 3812	56,94 063	56,80 371	61,90 100	61,89 408	62,88 343	58,1 801 9	55,59 614	58,0 8307

Таблица Б.14 - Полигон 14

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
14	чернозем	6	50-500	$48,1 \pm 8,8$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	50,73 568	52,8 3833	54,49 225	49,97 801	50,42 787	49,85 897	56,28 588	49,5 457	51,33 632	52,6 7061
Точка 2	56,10 363	50,7 5830	56,96 333	53,18 219	51,58 547	53,37 143	51,03 720	48,2 498	54,01 395	56,0 4432
Точка 3	50,36 875	49,9 9245	56,34 127	53,62 461	49,98 965	51,77 882	56,44 987	54,2 979	49,90 242	54,2 1749
Точка 4	53,85 157	49,1 1810	52,12 965	55,87 822	51,10 553	48,19 922	56,43 673	52,0 423	48,75 256	48,9 5310
Точка 5	48,18 266	53,8 0842	56,03 041	52,57 108	55,97 597	49,86 995	54,07 112	51,9 546	51,02 899	49,3 1422
Точка 6	51,88 978	49,7 0328	52,56 313	51,55 715	55,36 871	51,84 760	50,02 256	56,3 740	48,36 268	56,8 6155

Таблица Б.15 - Полигон 15

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
15	песчаный	6	50-500	$59,3 \pm 8,5$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500

Точ ка 1	62,6 5389	67,00 083	60,1 0318	64,05 176	60,5 3609	66,18 743	59,9 4421	65,8 936	59,6 4627	62,5 4575
Точ ка 2	63,5 9877	66,93 715	59,3 7612	62,35 975	63,5 0131	60,91 168	61,4 0090	62,3 1	66,4 4801	67,1 7067
Точ ка 3	60,4 8828	59,52 350	61,6 6756	60,20 142	64,4 7428	67,00 729	67,9 2821	62,3 9	63,5 2115	62,2 8787
Точ ка 4	65,0 0283	67,12 762	61,2 2317	61,88 737	60,3 0394	62,16 013	64,9 1479	62,9 5	66,4 2997	64,4 3548
Точ ка 5	65,4 0479	67,29 805	65,7 4696	67,50 162	65,5 2187	62,13 493	60,8 9221	61,4 6	60,1 9665	64,5 9056
Точ ка 6	63,2 4570	62,23 646	59,6 3490	64,15 853	67,3 6592	60,19 517	65,6 2972	59,6 0	65,6 9956	64,2 4225

Таблица Б.16 - Полигон 16

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
16	торфянной	6	50-500	32,0 \pm 10,7	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	35,8 8992	39,86 590	40,3 5956	32,54 877	42,6 7025	34,4 1732	33,4 7986	36,0 5095	40,8 6741	39,8 6907
Точ ка 2	39,7 2047	38,39 979	42,0 1834	40,87 849	41,3 1104	42,5 7131	32,9 1608	40,5 8455	35,8 8825	42,5 1805
Точ ка 3	40,5 4129	39,37 057	42,4 8913	37,81 804	42,4 3893	38,9 0994	40,0 2001	35,1 5237	33,3 9039	38,1 0421
Точ ка 4	34,7 6208	35,64 867	42,0 3648	36,98 356	35,5 8470	35,5 8127	39,0 6557	40,1 0006	37,5 5277	35,1 4327
Точ ка 5	32,0 6120	33,33 207	39,9 1240	42,36 183	41,7 0751	34,4 8739	39,1 7165	39,5 7630	42,1 9969	35,9 2574
Точ ка 6	41,5 3527	36,01 704	42,0 0674	40,52 045	38,0 5013	42,8 7588	35,8 6253	37,9 9486	36,6 0359	40,6 6493

Таблица Б.17 - Полигон 17

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
17	глинозем	6	50-500	$55,1 \pm 10,5$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	55,98 566	54,7 0000	53,30 229	54,96 207	50,85 564	53,82 940	50,36 489	52,0 7093	54,58 742	53,2 2121
Точка 2	51,03 939	54,4 0517	55,90 001	55,94 705	50,92 758	55,04 100	54,28 357	50,4 5808	50,63 011	55,2 2744
Точка 3	55,24 946	51,9 1373	54,34 738	50,95 496	51,65 255	52,52 023	54,99 402	50,1 7650	54,55 515	51,9 6657
Точка 4	51,86 676	50,3 5817	51,25 918	54,89 426	51,22 071	55,74 774	52,01 216	54,6 0775	51,82 717	53,9 3177
Точка 5	52,74 163	54,6 4237	53,07 206	52,53 855	55,87 376	51,05 733	54,46 472	50,2 2832	55,47 732	53,6 1263
Точка 6	50,93 027	52,6 7519	50,47 305	53,70 083	53,34 433	51,77 861	53,66 887	50,8 0982	51,60 675	51,2 1709

Таблица Б.18 - Полигон 18

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
18	зольный	6	50-500	$30,0 \pm 9,7$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	31,30 337	30,5 3	31,50 818	35,57 311	32,27 803	34,11 100	36,02 138	30,3 3	30,02 309	36,7 0588
Точка 2	34,92 085	35,1 2	36,84 398	36,21 707	31,27 097	34,86 774	33,80 437	32,7 5	33,55 873	33,0 0116

Точ ка 3	30,83 145	30,8 138	34,85 285	32,71 329	33,92 741	32,38 155	32,83 162	36,1 019	36,08 8	31,5 352	6295
Точ ка 4	34,62 783	35,0 982	36,13 2	35,19 531	33,78 386	33,62 979	31,88 139	33,3 444	33,17 2	30,9 310	8098
Точ ка 5	36,68 439	32,9 865	33,82 322	31,43 753	36,81 317	35,01 948	33,51 052	31,1 224	31,54 021	35,2 3250	
Точ ка 6	30,64 806	32,9 373	35,10 461	36,60 143	35,51 096	31,25 348	34,11 671	34,8 744	35,16 1	35,0 887	2364

Таблица Б.19 - Полигон 19

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
19	торфяной	6	50-500	43,1±10,9	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точ ка 1	47,82 963	45,1 6898	45,38 799	46,64 346	47,76 136	44,38 695	46,99 795	47,3 2507	48,61 738	47,7 8872
Точ ка 2	44,70 586	43,3 5864	47,53 410	44,92 757	47,96 036	43,11 216	48,97 358	43,6 6162	46,69 082	46,0 0418
Точ ка 3	44,59 687	45,1 5349	44,13 171	47,22 596	46,85 782	44,94 275	47,16 862	46,3 1731	43,76 422	43,3 5832
Точ ка 4	44,29 328	44,2 4638	48,21 422	48,70 228	44,63 059	45,90 580	45,23 992	45,9 9687	48,24 903	45,4 3945
Точ ка 5	47,43 377	44,7 0572	48,04 700	43,88 274	46,38 168	44,56 476	46,64 675	47,8 2764	45,11 041	45,7 0681
Точ ка 6	48,50 575	46,9 2391	47,67 135	48,48 478	47,46 845	45,83 785	48,78 449	46,2 8742	48,11 992	44,3 1414

Таблица Б.20 - Полигон 20

Номер полигона	Тип грунта	Число измерений	Глубина измерения см	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ $m \pm \sigma$	$\chi * 10^{-5}$ ед. СИ (min/max)
20	песчаный	6	50-500	$57,0 \pm 10,9$	81,3/110,7

Глубина см	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Точка 1	57,12 851	61,2 8599	64,91 387	60,30 154	59,01 234	62,12 564	60,11 737	59,4 4132	64,33 367	64,8 4875
Точка 2	58,38 354	64,6 7132	59,43 864	62,27 156	59,87 659	60,88 372	63,89 990	58,2 2561	62,44 715	60,4 8861
Точка 3	62,78 965	57,0 5880	64,85 174	61,99 793	63,08 893	64,62 649	61,76 881	58,7 2515	62,69 127	64,6 0406
Точка 4	64,10 515	59,1 2975	64,71 785	61,71 191	60,92 970	60,82 328	64,31 604	62,5 0229	58,72 470	62,5 1076
Точка 5	57,16 103	59,5 0332	64,49 997	60,84 489	64,10 202	60,65 107	60,21 154	62,7 1114	61,16 323	63,8 1142
Точка 6	57,62 375	58,2 8636	64,10 028	64,54 382	63,37 747	64,56 618	64,66 665	63,8 2260	57,14 929	63,4 8230

Раздел 3. Описание программ формирование базы данных магнитных свойств почвы из неструктурированных табличных данных измерения магнитной восприимчивости образцов

Созданная программа преобразует неструктурированные табличные и графические данные измерения магнитной восприимчивости объектов в базы данных Access, что значительно упрощает доступ к информации через системы управления базами данных (СУБД).

Преобразование данных из Excel в Access программа содержит три основных этапа (см. рисунок Б.3.1).



Рисунок Б.3.1 - Основные этапы перемещения данных

Получение исходных данных основывается на выделении результатов физико-химических анализов, представленных в технических отчетах. Так ниже приведены данные измерения на полигоне 2 (объект - полигон с рудой). Измерение показателя магнитной восприимчивости почв осуществлялось с помощью полевого измерителя магнитной восприимчивости ПИМВ -32 (таблица 1). Схема объекта и точки проведения замеров приведены на рисунке Б.3.2, а графическая интерпретация полученных результатов на рисунке Б.3.2.

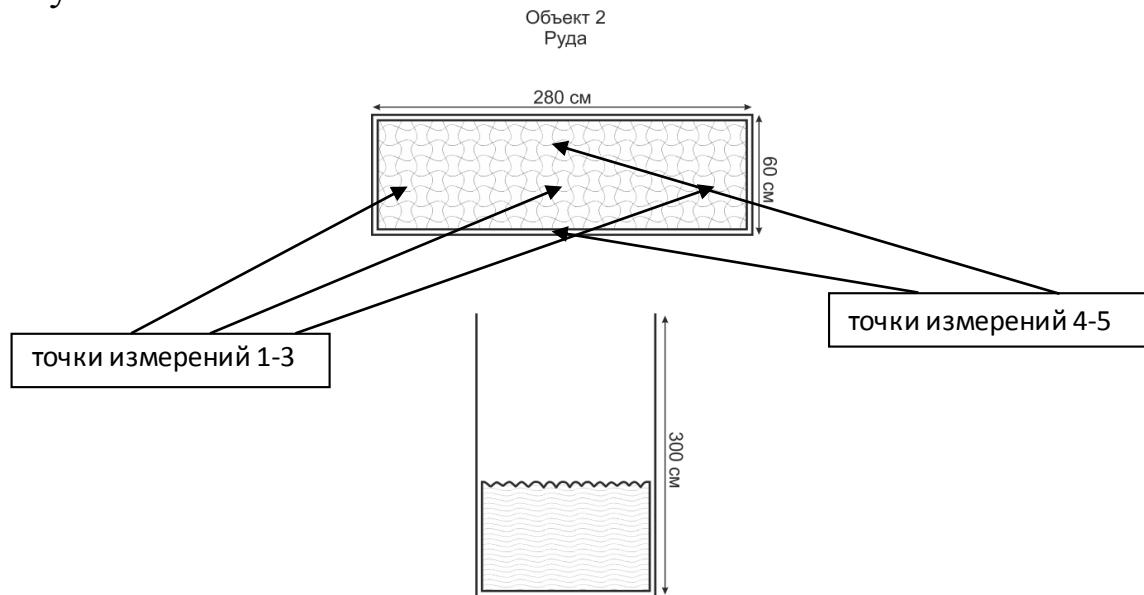


Рисунок Б.3.2 - Схема объекта и точки проведения замеров

Таблица Б.1 - Показания магнитной восприимчивости почв

номер	Глубина (см)	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
1.	0	34,0345	36,9329	37,8572	37,9311	34,8293
2.	10,00	30,6459	35,6146	33,5793	33,9972	32,9466
3.	20,00	39,9250	39,8100	36,5360	35,4505	38,2254

4.	30,00	39,0012	36,7681	38,4066	40,0495	38,3998
5.	40,00	39,2105	37,7071	35,1804	33,9286	34,5856
6.	50,00	29,7063	37,6001	34,9245	40,6676	35,5219
7.	60,00	39,8237	32,5490	38,8193	36,8825	36,4548
8.	70,00	30,9713	33,0492	30,9046	37,2913	31,1071
9.	80,00	33,5265	38,3143	34,5968	34,2065	35,7902
10.	90,00	34,5464	38,8466	35,5383	34,4093	40,9862
11.	100,00	34,0954	36,2764	32,6905	37,4245	35,9334
12.	110,00	36,7748	37,4522	37,3984	35,6710	32,9609
13.	120,00	37,5395	34,0589	34,3999	34,4190	39,3720
14.	130,00	41,9795	35,0487	36,0442	33,0789	35,4057
15.	140,00	45,6568	32,6126	36,4603	36,5956	32,3525
16.	150,00	169,9290	167,3886	169,5597	166,0725	162,5528
17.	160,00	162,6272	168,3729	170,3512	168,5970	166,4052
18.	170,00	164,1440	163,1695	165,2961	164,1583	169,3769
19.	180,00	162,4516	167,5386	164,7051	169,9277	164,6463
20.	190,00	170,0031	162,0319	165,8224	166,6269	166,2345



Рисунок Б.3.3 - Графическая интерпретация результатов измерения на полигоне 2

Запуск программы осуществляется запуском головного модуля СТАРТ и открывается основное меню программы. По умолчанию введены данные для контрольного примера и выделены красным цветом. Интерфейс программы реализован по принципу вкладок (рисунок Б.3.4).

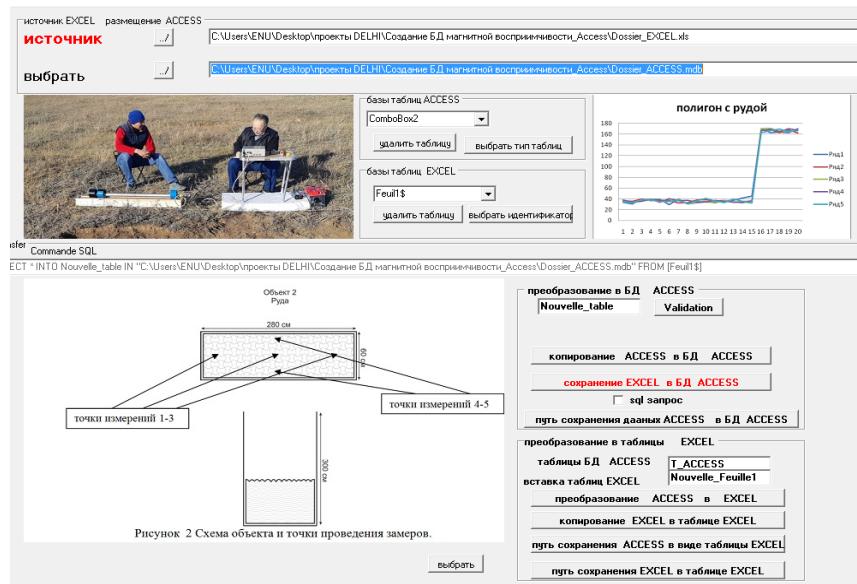


Рисунок Б.3.4 - Интерфейс программы

Вкладка "Источник" и "размещение БД (рисунок Б.3.5) позволяет указать место размещения исходных данных и конечный путь размещения БД. По умолчанию они будут размещены в корневом каталоге программы.

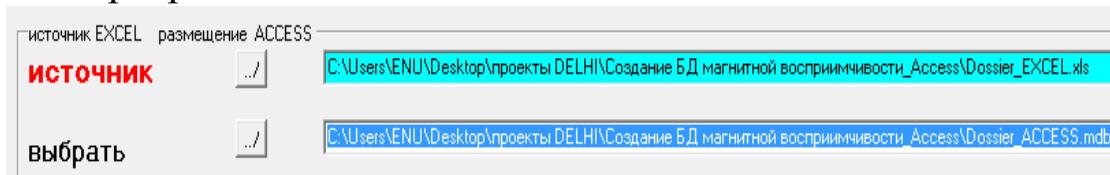


Рисунок Б.3.5 - Путь исходных данных и конечный путь размещения БД

Следующим обязательным моментом работы программы является нормирование ключей создаваемой базы данных Access и полей считывания данных таблицы Excel (рисунок Б.3.6).

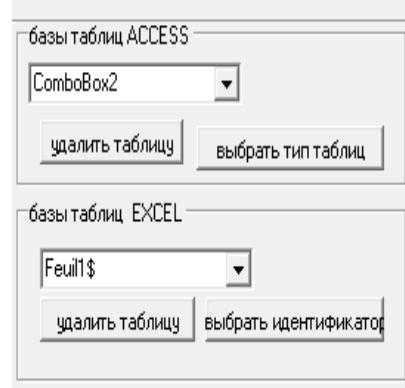


Рисунок Б.3.6 - Нормализация данных

Завершающим этапом работы программы является прямое или обратной преобразование (рисунок Б.3.7) табличных данных измерения магнитной восприимчивости почвы в виде Excel, данных GPS, различных фото и видеоматериалов в базы данных Access.

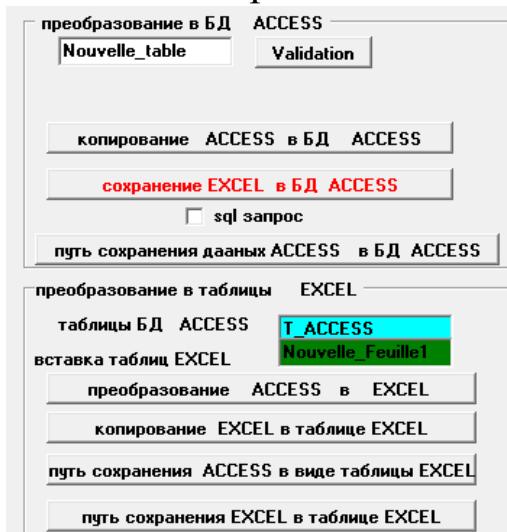


Рисунок Б.3.7 - Прямое или обратной преобразование данных измерения магнитной восприимчивости

Программа реализована в интерактивном виде и позволяет в диалоге менять исходные данные и проводить как прямое так и обратной преобразование табличных данных измерения магнитной восприимчивости почвы в виде Excel, данных GPS, различных фото и видеоматериалов в базы данных Access. Создаваемая БД Access по умолчанию они будут размещена в корневом каталоге программы. При разработке созданного программного обеспечения применение UML и других языков графического описания для объектного моделирования нецелесообразно. Так как UML является одним из средств проектирования систем со сложным интерфейсом (бизнес процессы, корпоративные информационные системы).

Приложение В. Экспериментальные измерения георадаром Зонд-12

Раздел 1. Экспериментальные измерения по приему отраженных сигналов

Объект №2. Однородный песок.

Вторым объектом была модель ненарушенной среды с однородным строением. Расположение профилей и схема участка представлена на рисунке В.1. Полученные радарограммы на рисунках В.1.2-К.1.5. На всех радарограммах видно однородное ненарушенное строение толщи, что соответствует модели.

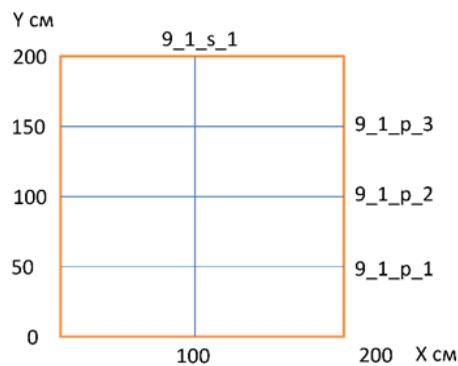


Рисунок В.1.1 - Схема участка 1 и расположение на нем профилей

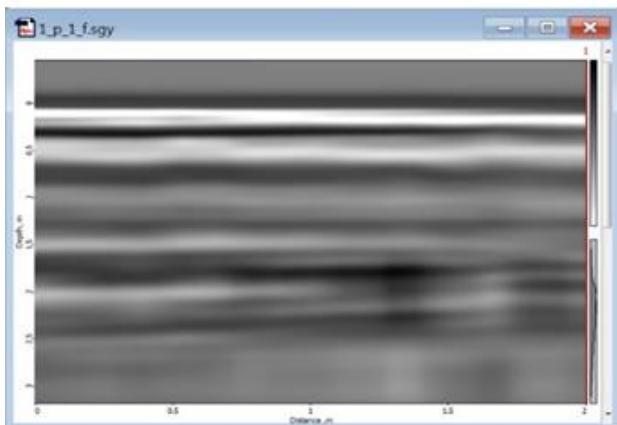


Рисунок В.1.2 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 1

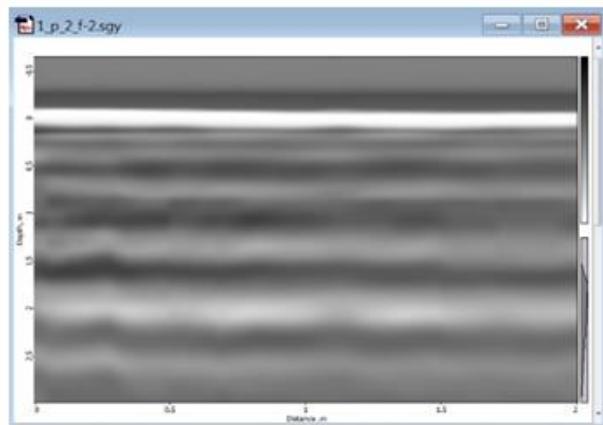


Рисунок В.1.3 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 1

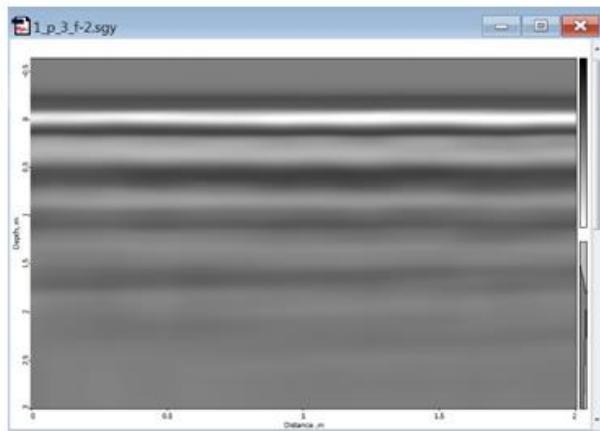


Рисунок В.1.4 - Радарограмма третьего продольного профиля на участке 1

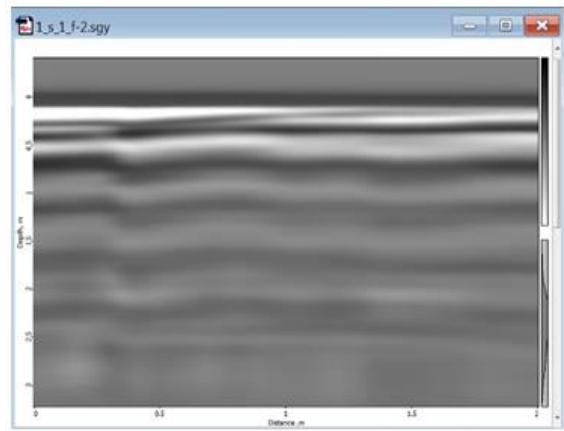


Рисунок В.1.5 - Радарограмма первого секущего профиля на участке 1

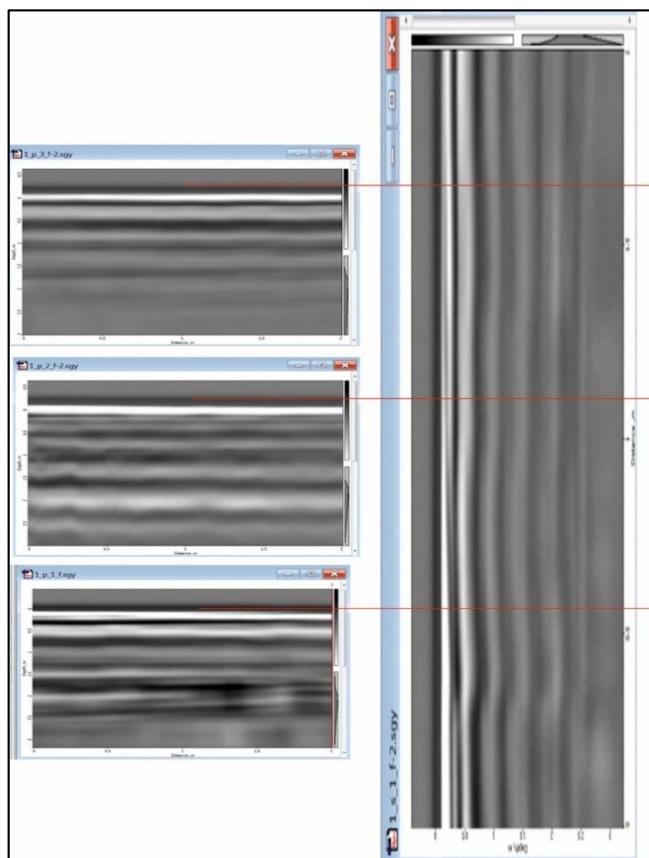


Рисунок В.1.6 - Двумерное представление результатов съемки на участке 1

Объект №3. 2 трубы с соленой водой.

Третьим объектом была модель среды, состоящей из однородного песка с искусственно созданными двумя неоднородностями. Они создавались по следующей схеме: на глубину метр вертикально закапывалась труба ПВХ с сечением 100мм. Далее в нее наливалась вода с содержанием соли 36%. Этот раствор растекался из торца трубы

в среду. После того, как залили 40 литров соленой воды, труба была извлечена, а на поверхности произведены измерения. Предполагалось, что соленая вода сформирует подобие соляного купола. Расстояние между осями труб составляло 120 см. Первая труба находилась на расстоянии 100 см от начала профиля, а вторая на расстоянии 220 см. Расположение профилей и схема участка представлена на рисунке B.1.7.

На продольных профилях 3 и 4 обнаруживаются тела, которые по расположению соответствуют модельным объектам. Они выглядят как точки дифракции, которые начинаются с отрицательной амплитуды. Значения диэлектрической проницаемости соответствуют пескам, а глубина равна примерно 40-50 сантиметров. Это связано с тем, что трубу вытащили. Из-за этого вода вытекала через стенки скважины не только на глубине метр, но и выше по стволу. Параллельными профилями определено, что вода создала не куполообразный объект, а вытянутый по направлению к оси ОХ, схема распространения аномалии показана на рисунке 17. Задача пространственного определения объекта решена.

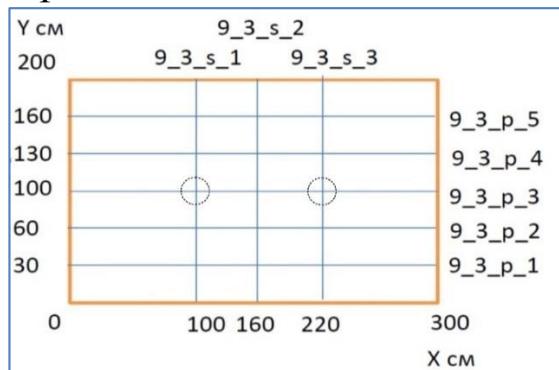


Рисунок B.1.7 - Схема участка 3 и расположение на нем профилей

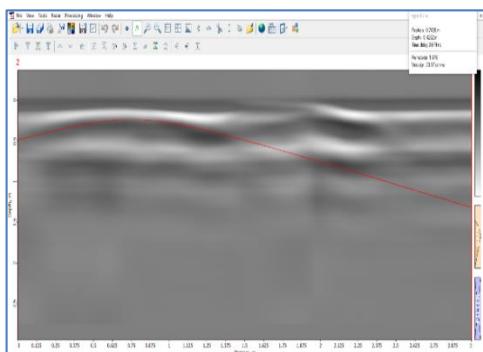


Рисунок B.1.8 - Радарограмма третьего продольного профиля на участке 3

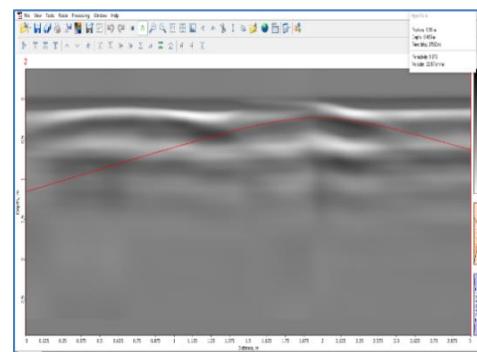


Рисунок B.1.9 - Радарограмма четвертого продольного профиля на участке 3

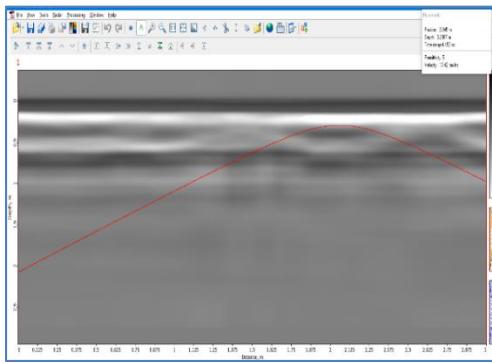


Рисунок В.1.10 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 3

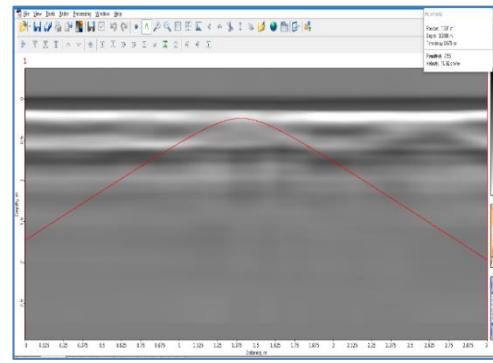


Рисунок В.1.11 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 3

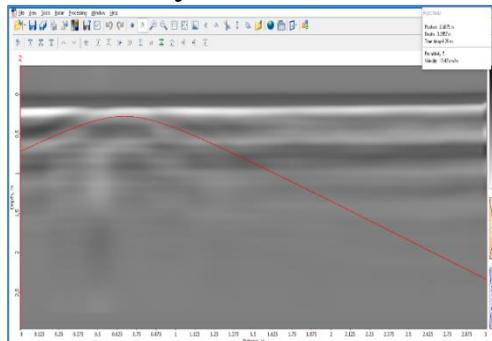


Рисунок В.1.12 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 3

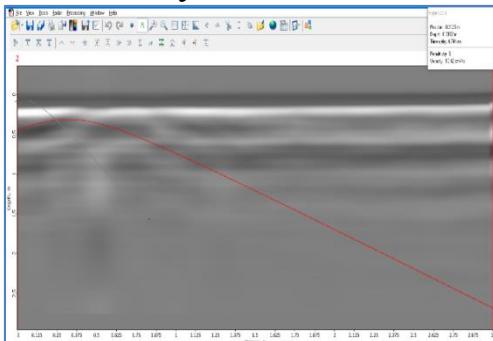


Рисунок В.1.13 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 3

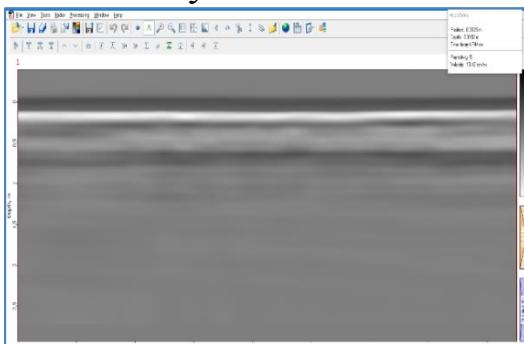


Рисунок В.1.14 - Радарограмма второго секущего профиля на участке 3

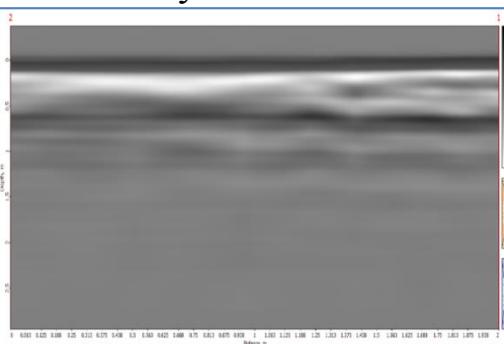


Рисунок В.1.15 - Радарограмма первого секущего профиля на участке 3

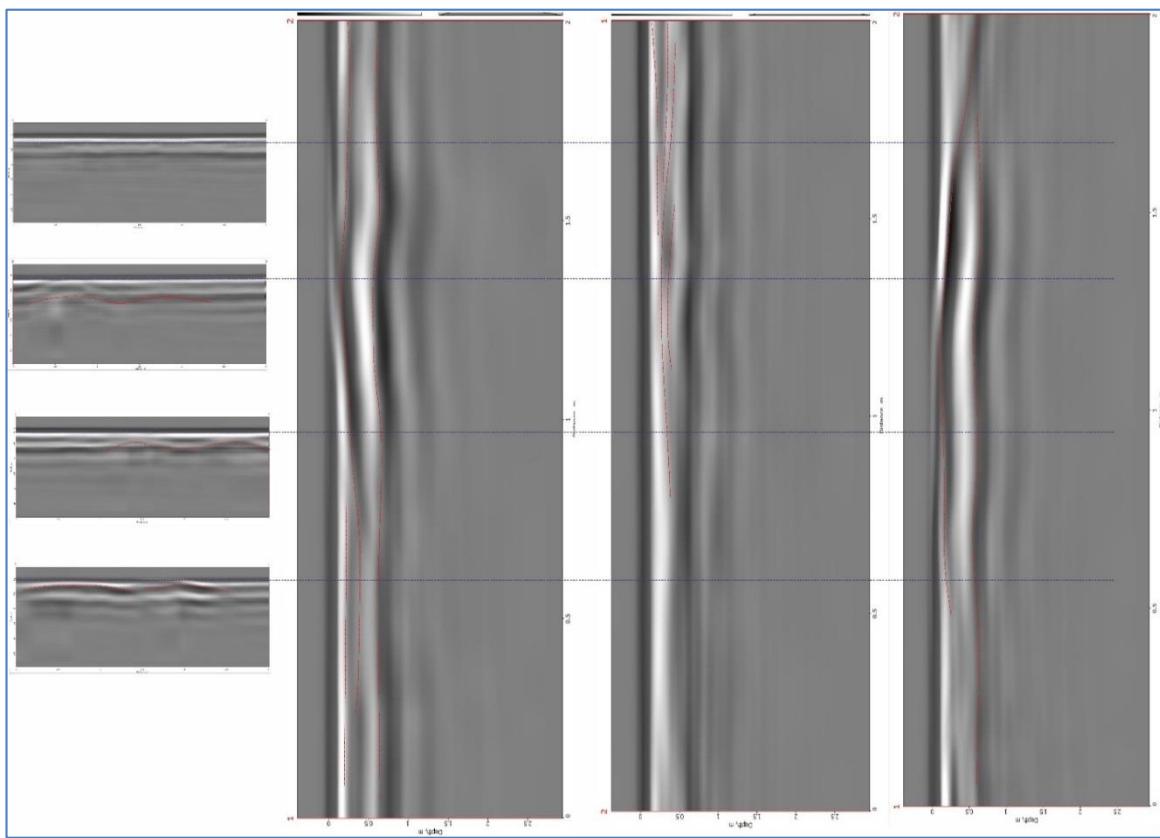


Рисунок В.1.16 - Взаимное расположение радарограмм с выделенными аномалиями

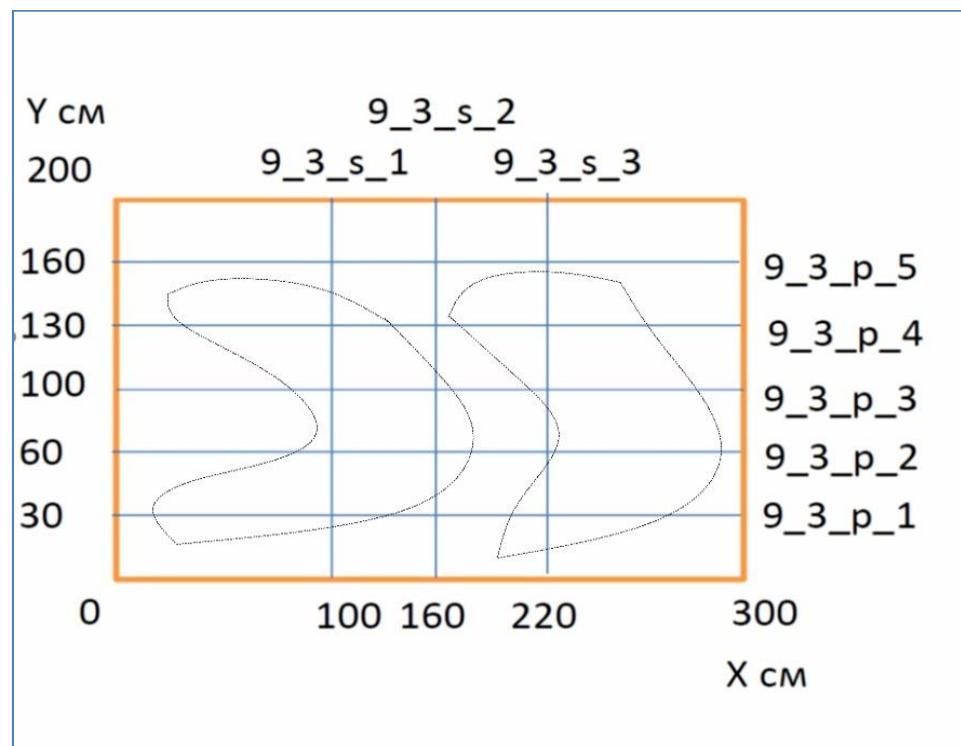


Рисунок В.1.17 - План аномальных зон на карте фактического материала

Объект №4. 1 труба с соленой водой.

Четвертым объектом была модель среды, состоящей из однородного песка с искусственно созданной неоднородностью. Она создавалась по схеме объекта 4. Предполагалось, что соленая вода сформирует подобие соляного купола. Ось трубы находилась на расстоянии 85 см от начала площадки объекта по оси ОХ и на расстоянии метр от начала площадки по оси ОY. Расположение профилей и схема участка представлена на рисунке В.1.18.

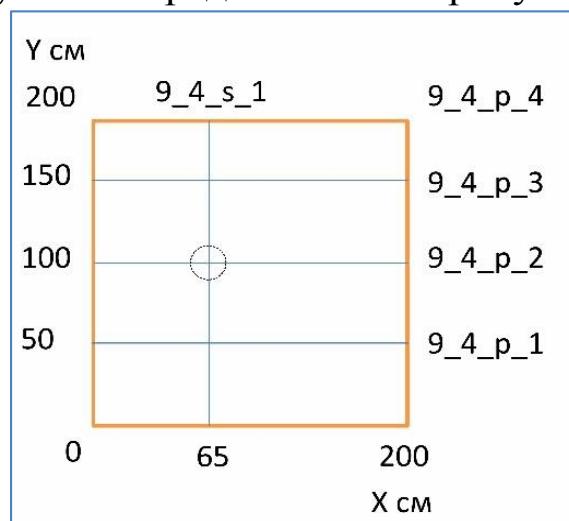


Рисунок В.1.18 - Схема участка 4 и расположение на нем профилей

На радарограммах наблюдается объект, который аналогично предыдущей модели начинается с отрицательной оси синфазности и представляет собой точку дифракции, под которой наблюдается прерывание положительной оси синфазности на глубине 75 сантиметров, что говорит о нарушенности однородности среды, что нормально при создании объекта. Так можно говорить, что объект обнаружен. Глубина его расположения составляет 20 сантиметров, так как трубу вытащили. Из-за этого вода вытекала через стенки скважины не только на глубине метр, но и выше по стволу. Благодаря сети наблюдения видно, что вода образовала объект, вытянутый по направлению с С на Ю (если считать ОХ – Ю-С, а ОY – З - В), что показано на рисунке В.1.23.

На продольных профилях 3 и 4 особенностей не наблюдается. Радарограммы обладают идентичной с секущим профилем картиной чередования осей синфазности.

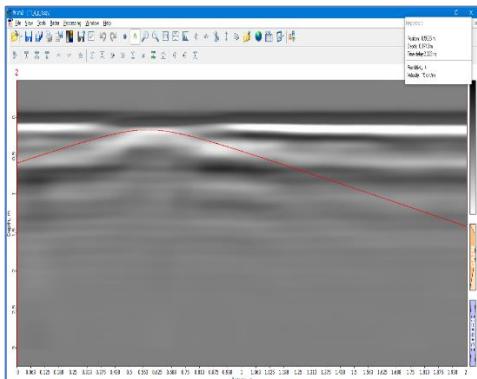


Рисунок В.1.19 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 4

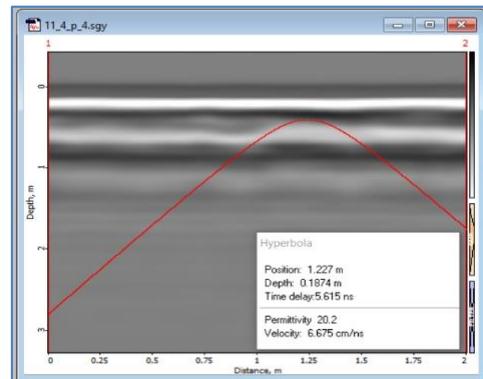


Рисунок В.1.20 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 4

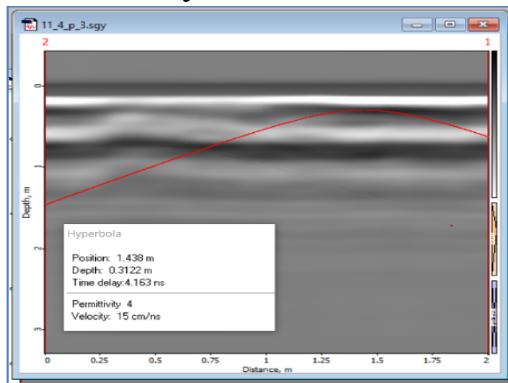


Рисунок В.1.21 - Радарограмма третьего продольного профиля на участке 4

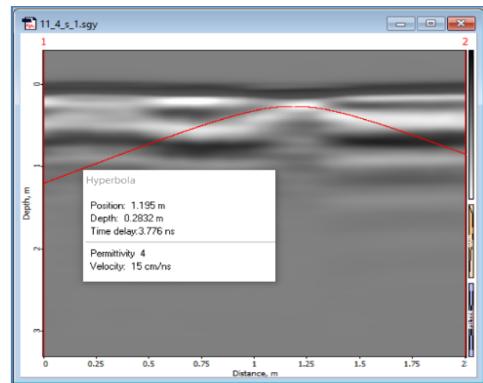


Рисунок В.1.22 - Радарограмма секущего профиля на участке 4

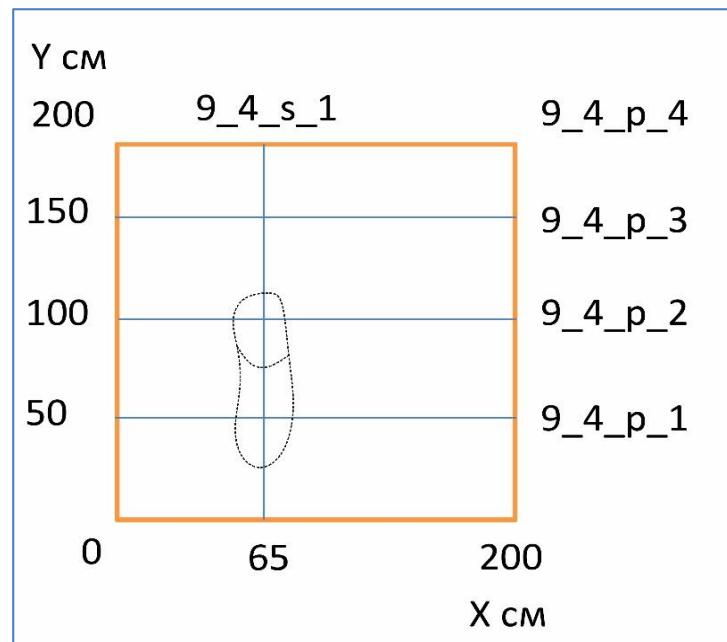


Рисунок В.1.23 - План аномальных зон на карте фактического материала

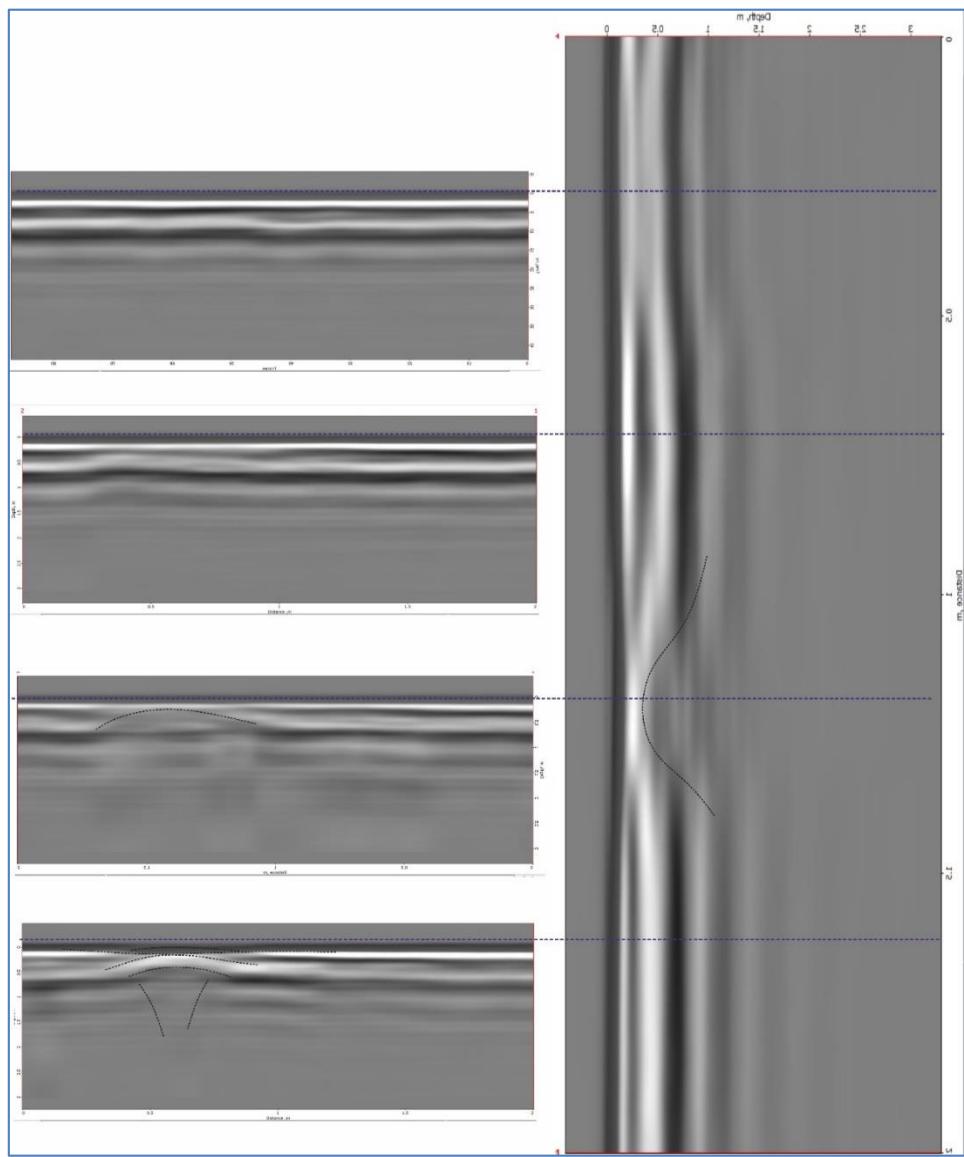


Рисунок B.1.24 - Взаимное расположение радарограмм

Объект №5. Соляной купол.

Пятым объектом была модель соляного купола, расположенного на глубине 80 сантиметров высотой 40 сантиметров в вершине, диаметром 30 см. Объект находился в однородном песке. Схема объекта и расположение профилей изображены на рисунке B.1.25. На радарограммах (рис. B.1.26- B.1.33, B.1.35) хорошо выделяется аномальный объект на глубине 35 см на пикетах 80-150 на секущем профиле и на пикетах 130-200 на продольных профилях под номерами 3, 4 и 5. Глубина на профилях 3 и 5 по сравнению с профилем 4 изменяется. Глубина аномального объекта составляет 40 см. Таким образом можно утверждать, что удалось не только определить

латеральное расположение аномального объекта, но и откартировать его геометрию по глубине (см.рисунок В.1.34).

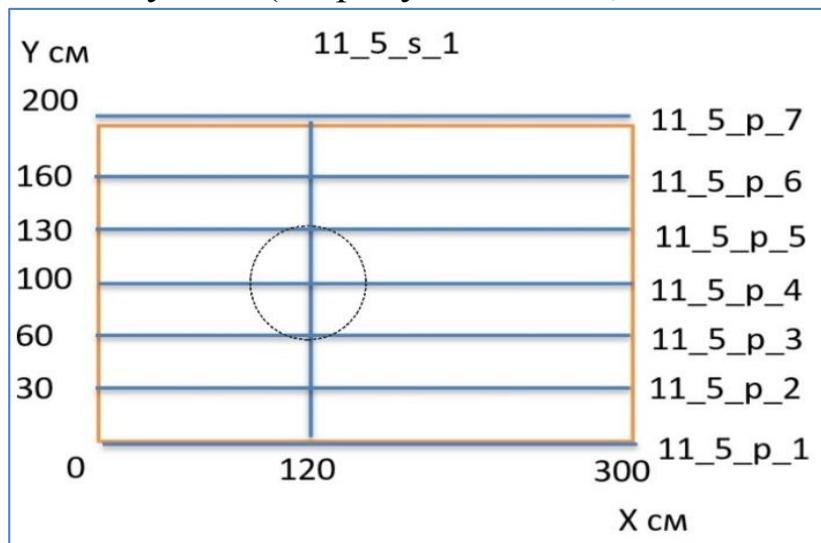


Рисунок В.1.25 - Схема участка 5 и расположение на нем профилей

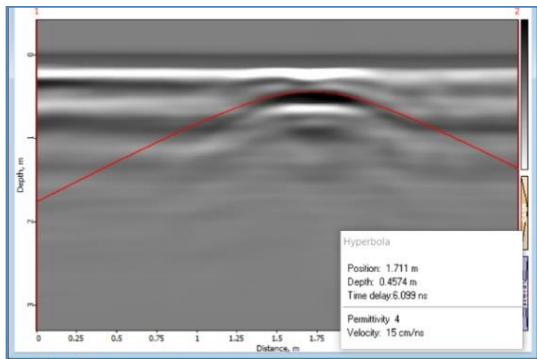


Рисунок В.1.26 - Радарограмма четвертого продольного профиля на участке 5

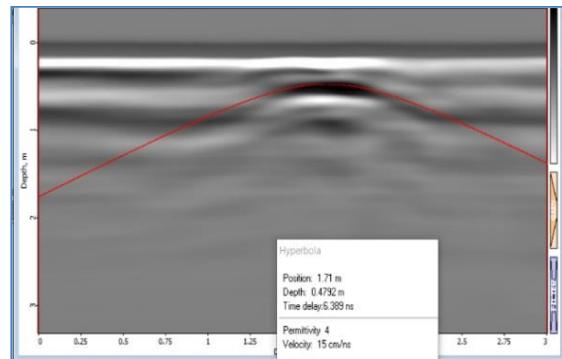


Рисунок В.1.27 - Радарограмма пятого продольного профиля на участке 5

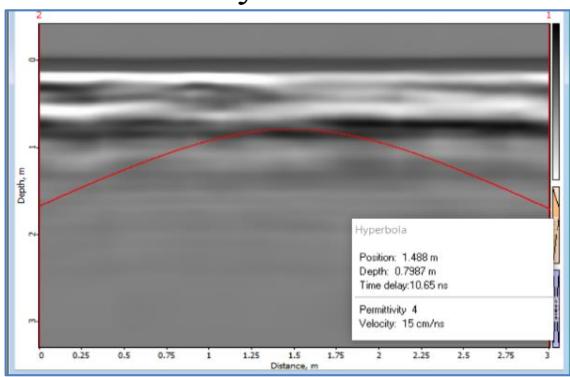


Рисунок В.1.28 - Радарограмма шестого продольного профиля на участке 5

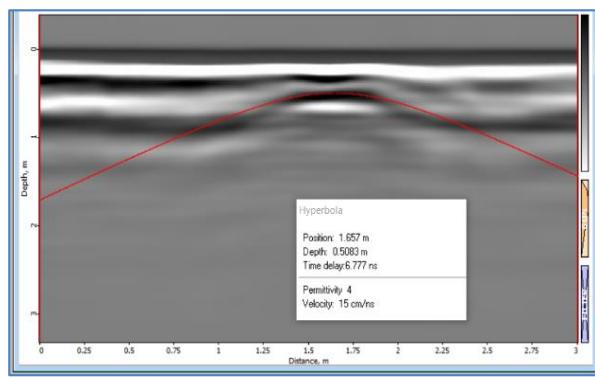


Рисунок В.1.29 - Радарограмма третьего продольного профиля на участке 5

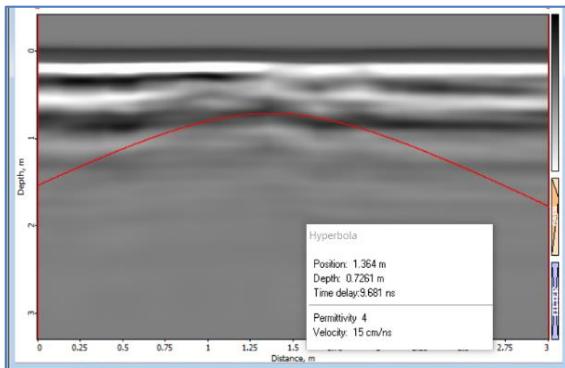


Рисунок В.1.30 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 5

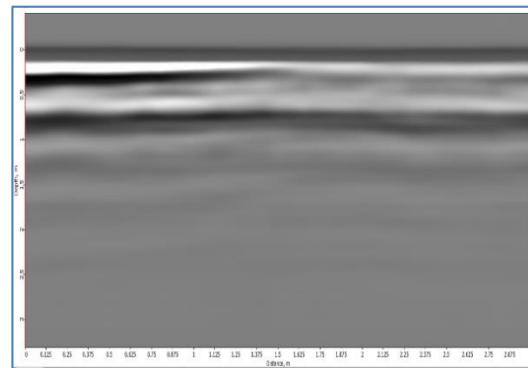


Рисунок В.1.31 - Радарограмма седьмого продольного профиля на участке 5

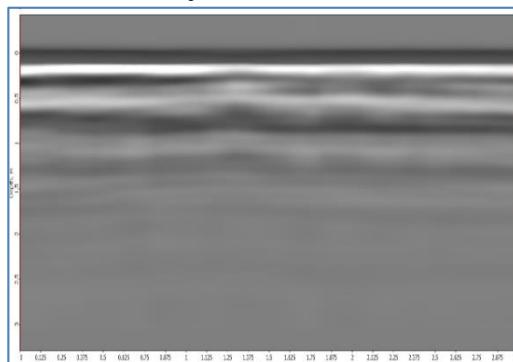


Рисунок В.1.32 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 5

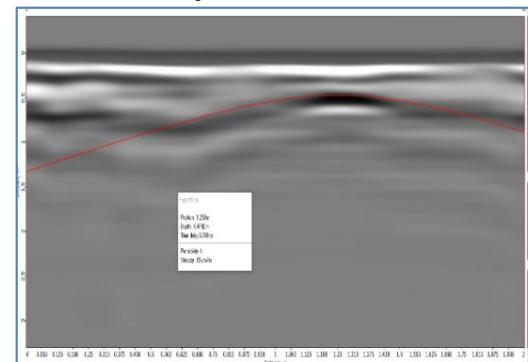


Рисунок В.1.33 - Радарограмма четвертого продольного профиля на участке 5

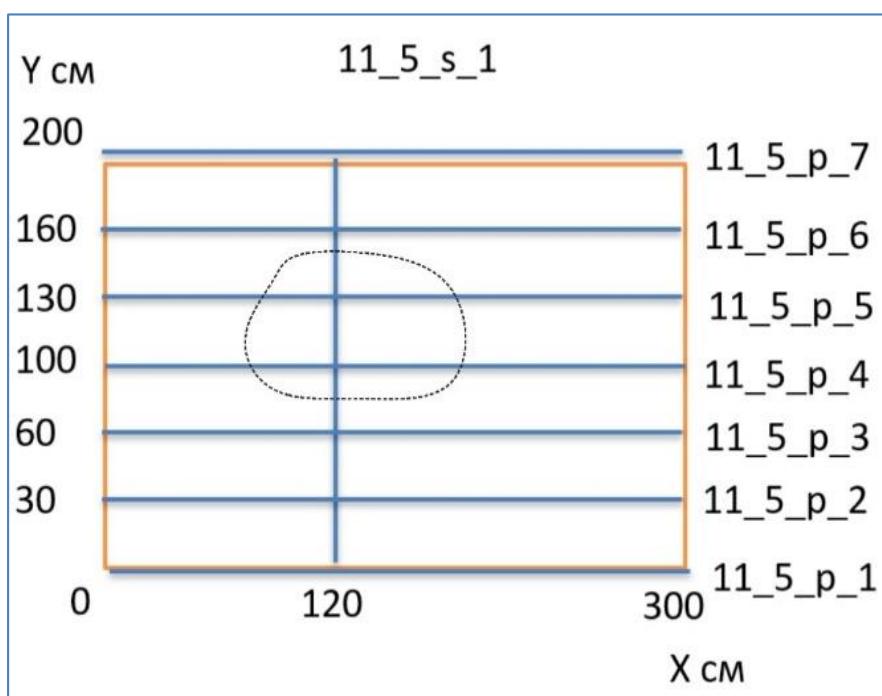


Рисунок В.1.34 - План аномальных зон на карте фактического материала

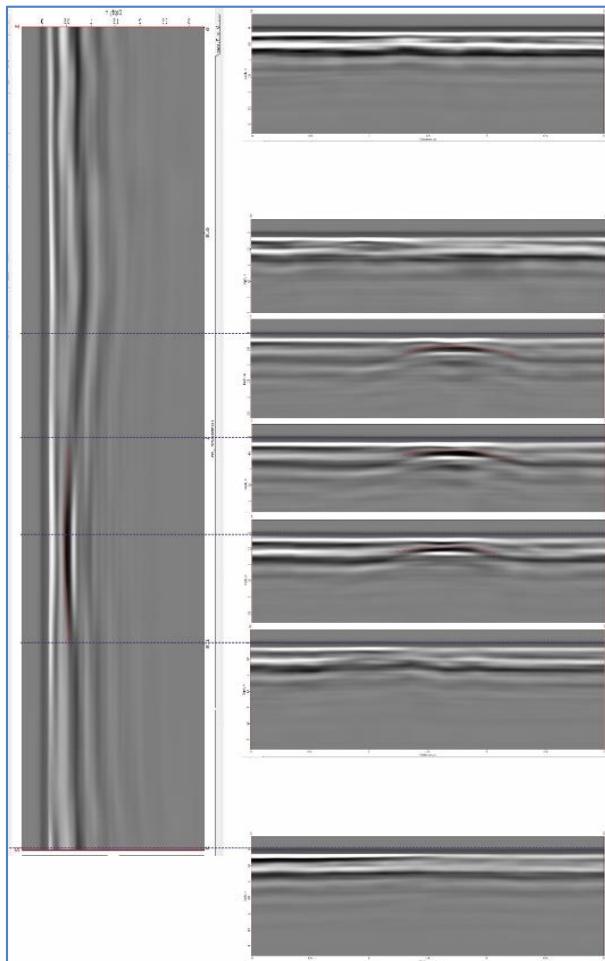


Рисунок B.1.35 - Взаимное расположение радарограмм

Объект №6. Два металлических листа.

Шестым объектом была модель, состоящая из двух металлических пластин, которые лежали плашмя на глубине 40 см. Они имели размер 40*40 см. Между ними было расстояние 1 метр. Листы находились в однородном песке. Схема объекта и расположение профилей изображены на рисунке B.1.36.

На краях пластин поле георадара искажалось таким образом, что появлялись точки дифракции, но половина гиперболы, характерной для точек дифракции экранировалась пластиной, поэтому на радарограммах пластины выглядят как очень вытянутые в вершине по горизонтали точки дифракции (рисунки К.1.37-44, К.1.46). С их помощью нельзя корректно подобрать диэлектрическую проницаемость вмещающей среды с помощью инструментов обработки, но искомые объекты хорошо видны при анализе радарограмм. Результаты интерпретации (рисунок B.1. 45) хорошо совпадают с моделью.

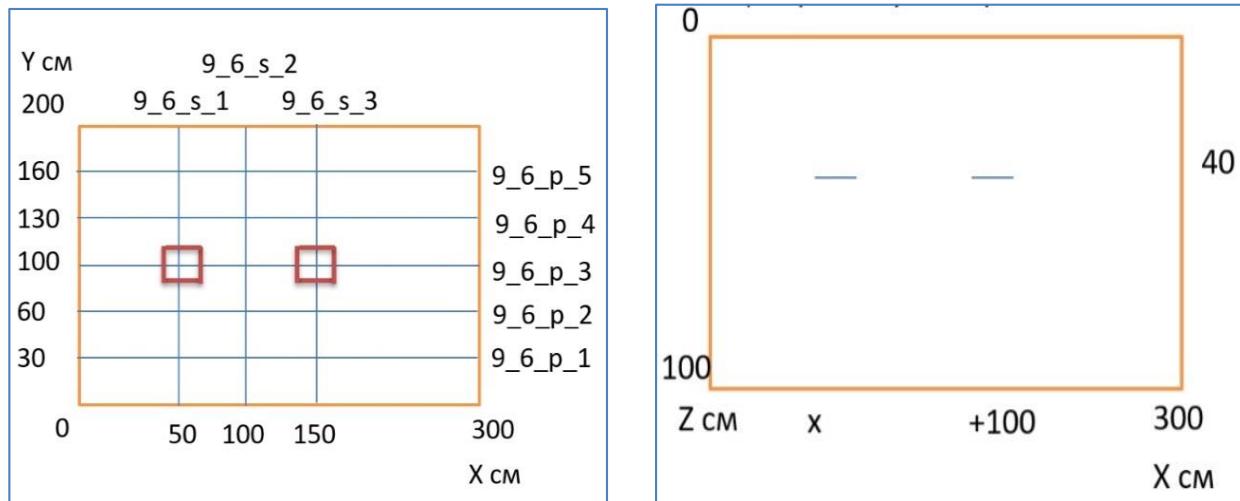


Рисунок В.1.36 - Схема участка 6 и расположение на нем профилей

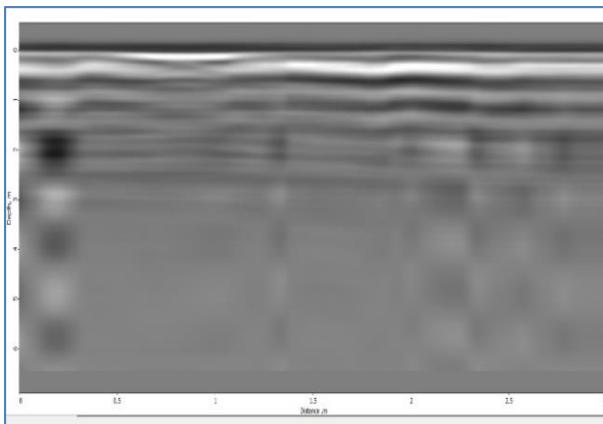


Рисунок В.1.37 - Радарограмма первого продольного профиля на участке 6

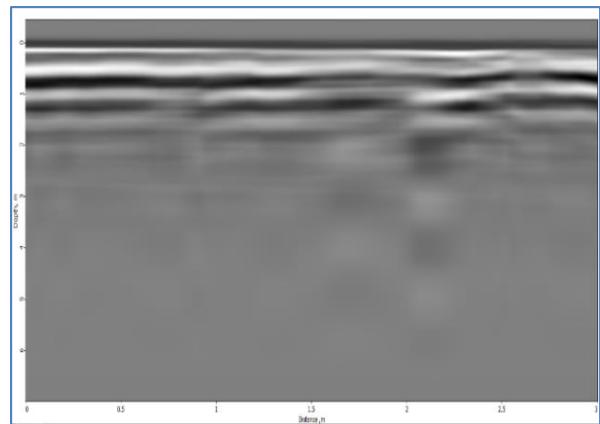


Рисунок В.1.38 - Радарограмма второго продольного профиля на участке 6

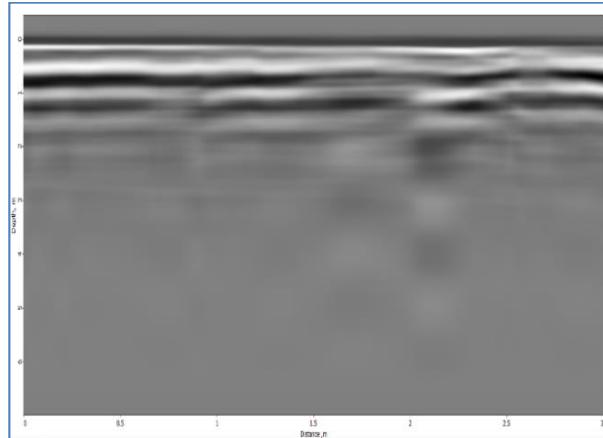


Рисунок В.1.39 - Радарограмма третьего продольного профиля на участке 6

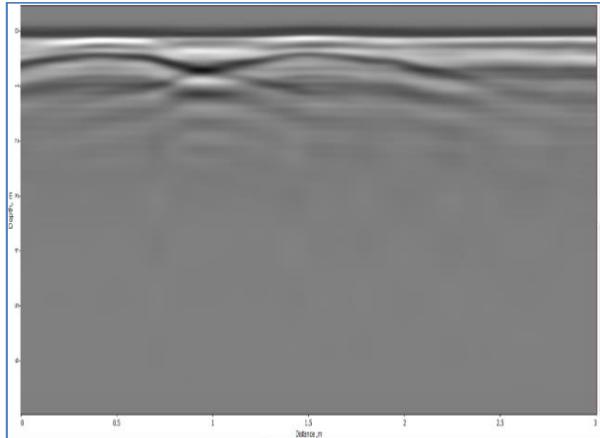


Рисунок В.1.40 - Радарограмма четвертого продольного профиля на участке 6

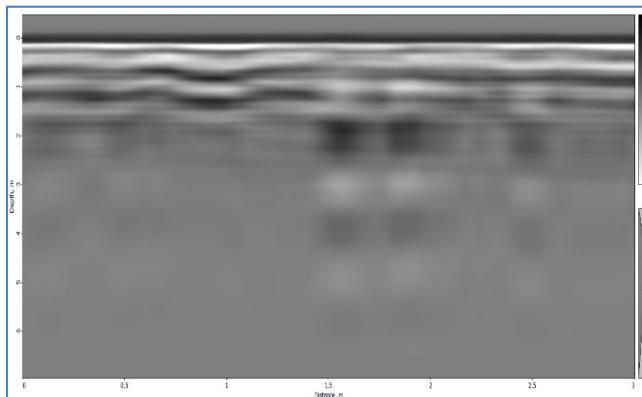


Рисунок В.1.41 - Радарограмма пятого продольного профиля на участке 6

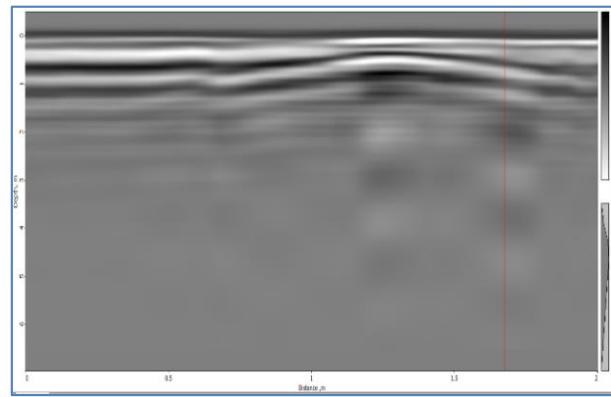


Рисунок В.1.42 - Радарограмма первого секущего профиля на участке 6

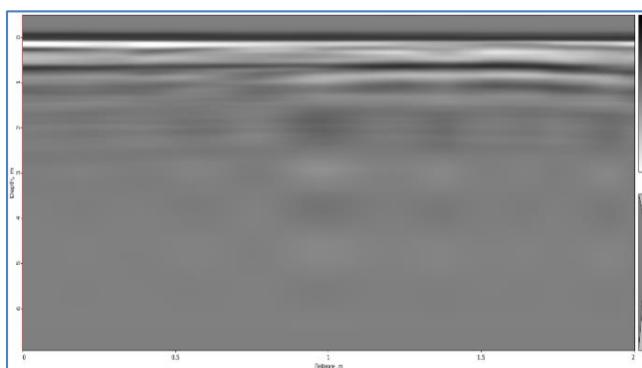


Рисунок В.1.43 - Радарограмма второго секущего профиля на участке 6

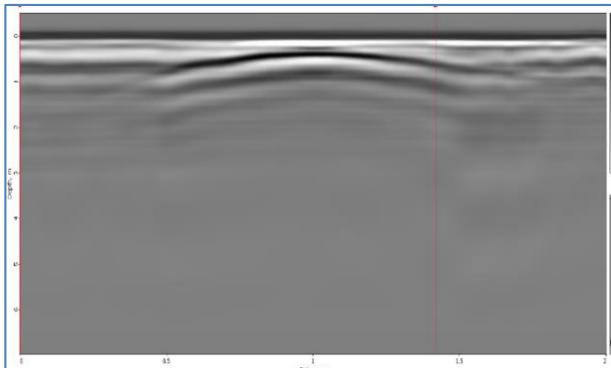


Рисунок В.1.44 - Радарограмма третьего секущего профиля на участке 6

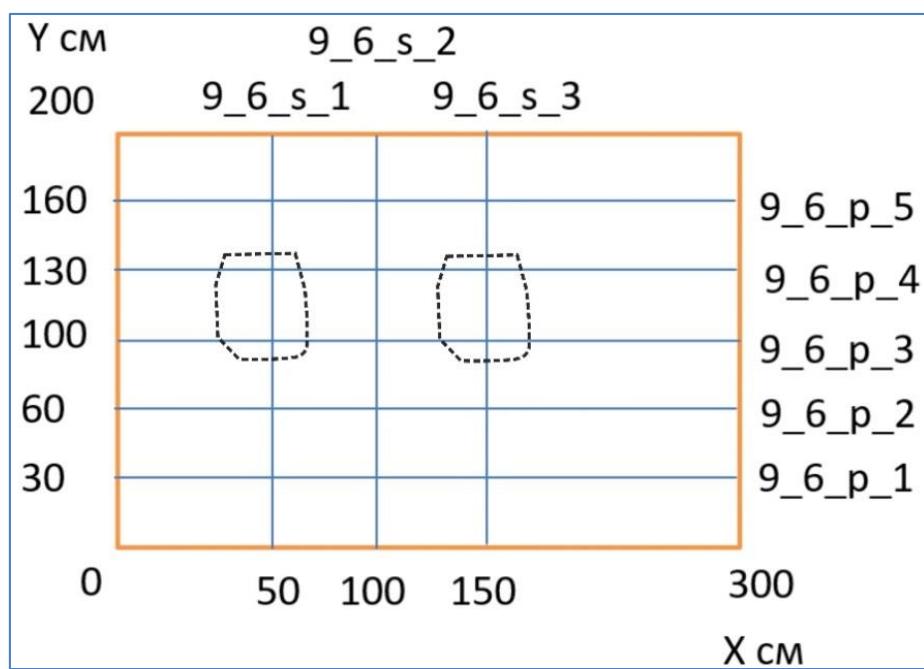


Рисунок В.1.45 - План аномальных зон на карте фактического материала

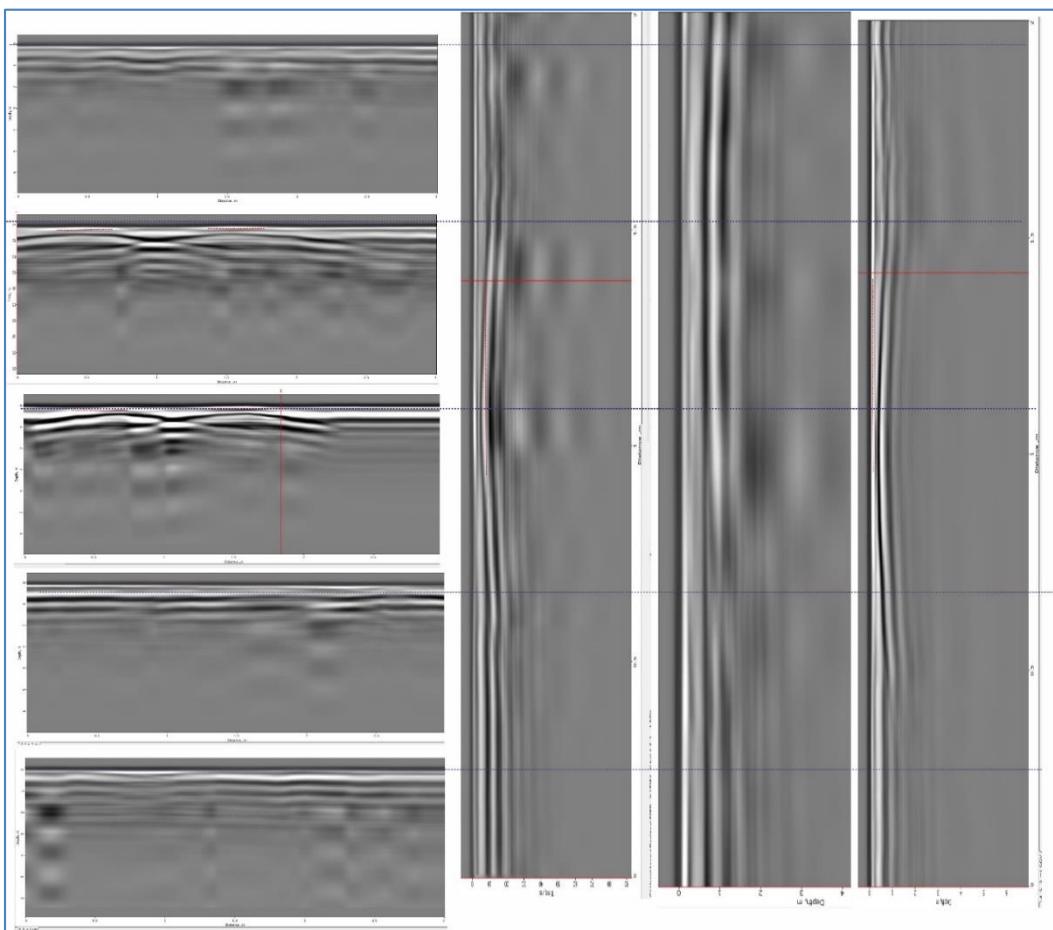


Рисунок В.1.46 - Взаимное расположение радарограмм

Приложение Г. Характеристики и интерфейс базы данных сигнала по данным георадара

Таблица Г.2.1 - Таблица «Эксперименты»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Тип эксперимента	esperimentType	bigint	внешний ключ
Наименование	name	varchar(200)	необязательное многозначное поле
Описание	description	text	необязательное многозначное поле
Дата	dte	date	необязательное поле
Тип антенны радара	radarAntennaType	bigint	внешний ключ
Глубина профиля	profileDepth	float	необязательное поле
Частота антенны	antennaFrequency	float	необязательное поле
Файл данных	txtFile	bigint	внешний ключ
Имя файла данных	txtFileName	varchar(200)	необязательное поле
Файл источника	sourceFile	bigint	внешний ключ
Имя файла источника	sourceFileName	varchar(200)	необязательное поле
Файл данных считан успешно	txtFileReadSuccess	bit	необязательное поле
Файл с фотографиями	imgFile	bigint	внешний ключ

Таблица Г.2.2 - Таблица «Материалы эксперимента»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Номер эксперимента	exsperimentId	bigint	внешний ключ
Номер материала	matterId	bigint	внешний ключ
Высота	height	float	необязательное поле

Таблица Г.2.3 - Таблица «Фотографии эксперимента»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Номер эксперимента	exsperimentId	bigint	внешний ключ
Файл фотографиями	imgFile	bigint	внешний ключ
Имя файла фотографией	imgFileName	varchar(200)	необязательное поле
Описание	description	text	необязательное многозначное поле

Таблица Г.2.4 - Таблица «Материалы»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Тип материала	matterType	bigint	внешний ключ
Наименование	name	varchar(200)	необязательное многозначное поле
Описание	description	text	необязательное многозначное поле
Высота	height	float	необязательное поле
ε_{min}	epsilonMin	float	необязательное поле
ε_{max}	epsilonMax	float	необязательное поле
μ_{min}	muMin	float	необязательное поле
μ_{max}	muMax	float	необязательное поле
σ_{min}	sigmaMin	float	необязательное поле
σ_{max}	sigmaMax	float	необязательное поле

Таблица Г.2.5 - Таблица «Радары»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Наименование	name	varchar(200)	необязательное многозначное поле
Описание	description	text	необязательное многозначное поле

Таблица Г.2.6 - Таблица «Антенны радара»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Радар	radarId	bigint	внешний ключ
Длина	length	float	необязательное поле
Частота антенны	frequancy	float	необязательное поле

Таблица Г.2.7 - Таблица «Трассы»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Номер эксперимента	exsperimentId	bigint	внешний ключ
Значение x	x	bigint	необязательное поле

Таблица Г.2.8 - Таблица «Детали трассы»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Номер трассы	trailsId	bigint	внешний ключ
Значение у	у	bigint	необязательное поле
Значение а	а	bigint	необязательное поле

Таблица Г.2.9 - Таблица «Высота трассы»

Содержание поля	Имя поля	Тип, длина	Примечание
Номер записи	id	bigint	первичный ключ
Номер трассы	trailsId	bigint	внешний ключ
Материал	matterId	bigint	внешний ключ

Высота	height	float	необязательное поле
ϵ	epsilon	float	необязательное поле
μ	mu	float	необязательное поле
σ	sigma	float	необязательное поле

На рисунке Г.2.1 показана схема данных БД.

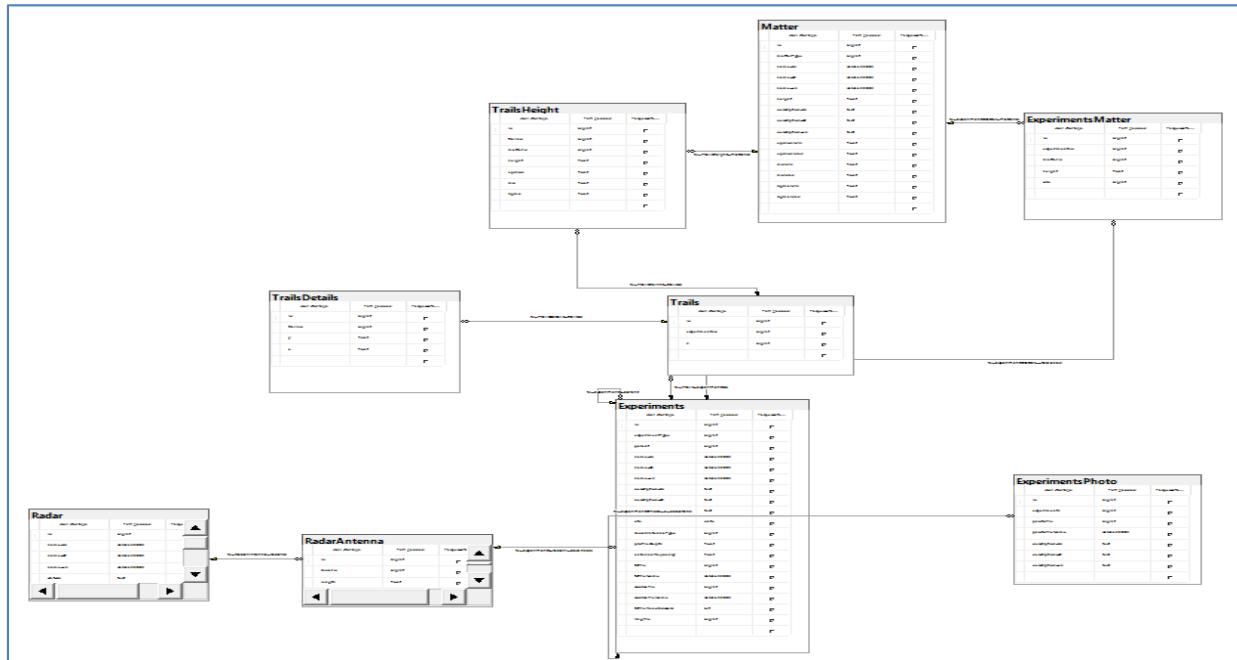


Рисунок Г.2.1 - Схема данных

Для более удобной работы с данными базы данных было разработано веб-приложение.

Раздел 3. Разработка веб-приложения

При запуске приложения открывается окно авторизации (см. рисунок Г.2.2), которое требует ввод корректных логина пользователя и пароля для доступа к данным системы.

Окно авторизации веб-приложения. Виджеты: логотип пользователя, поле для ввода логина (заполнено 'admin'), поле для ввода пароля (заполнено '*****'), кнопка 'Вход' с изображением логотипа.

Рисунок Г.3.1 - Авторизация пользователя

Веб-приложение имеет главное меню, состоящее из трех пунктов:

- а) Администрирование
- б) Справочники
- с) Эксперименты.

Используя команды меню «Администрирование», пользователь, обладающий соответствующими правами, может создавать, редактировать и удалять пользователей и определять роли, назначая им различные уровни доступа работы с данными и программой (см. рисунки Г.3.2- Г.3.3).

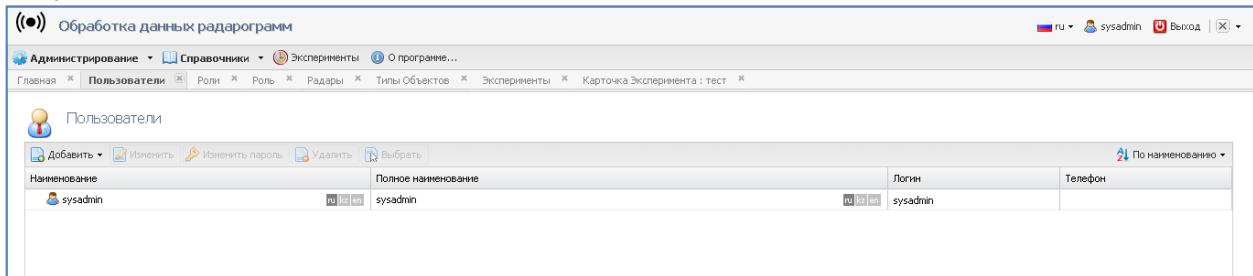


Рисунок Г.3.2- Окно «Администрирование – Пользователи»

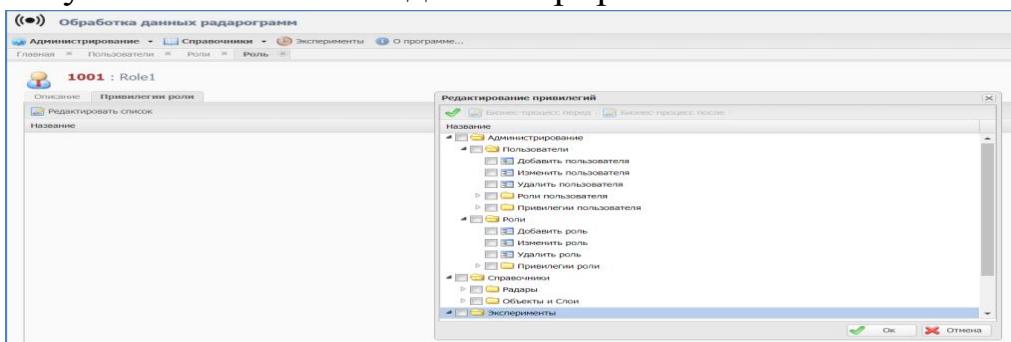


Рисунок Г.3.3 - Определение привилегий роли

Веб-приложение предполагает работу с тремя справочниками: радары, объекты и слои. Справочник «Радары» (см. рисунок Г.3.4) содержит список радаров, их описание и характеристики антен (длина и частота антенны).

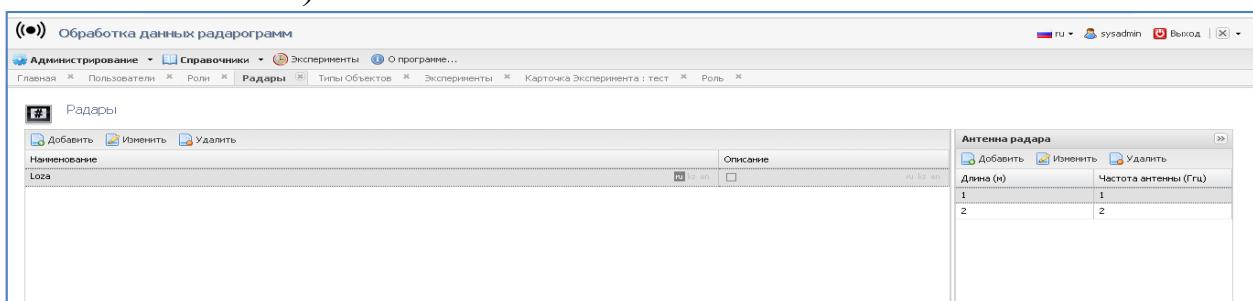


Рисунок Г.3.4 - Справочник «Радары»

В справочнике «Объекты» (рисунок Г.3.5) можно хранить информацию о возможных объектах, размещенных на полях во время проведения экспериментов. Каждый объект характеризуется

наименованием, высотой, ε_{min} , ε_{max} , μ_{min} , μ_{max} , σ_{min} , σ_{max} и описанием, которое может содержать какую-либо дополнительную информацию.

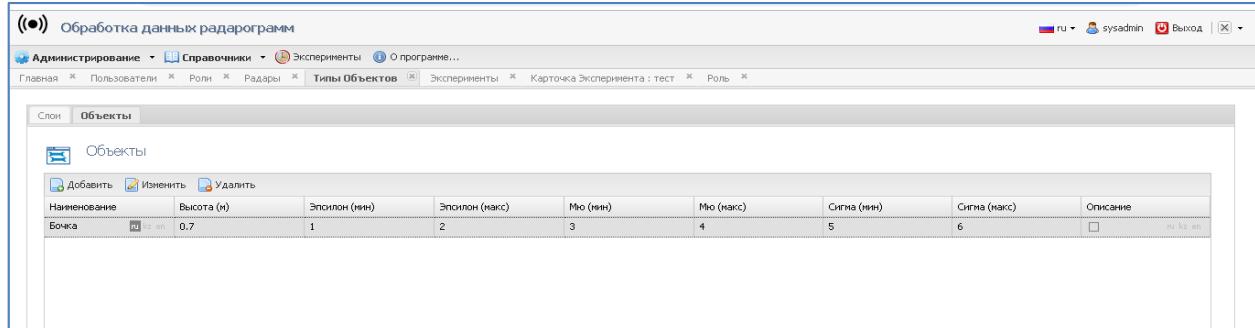


Рисунок Г.3.5 - Справочник «Объекты»

Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами. Затухание определяет глубинность зондирования, скорость -расстояние до отражающей границы. В справочник «Слои» (рисунок Г.3.6) следует заносить необходимую информацию о слоях.

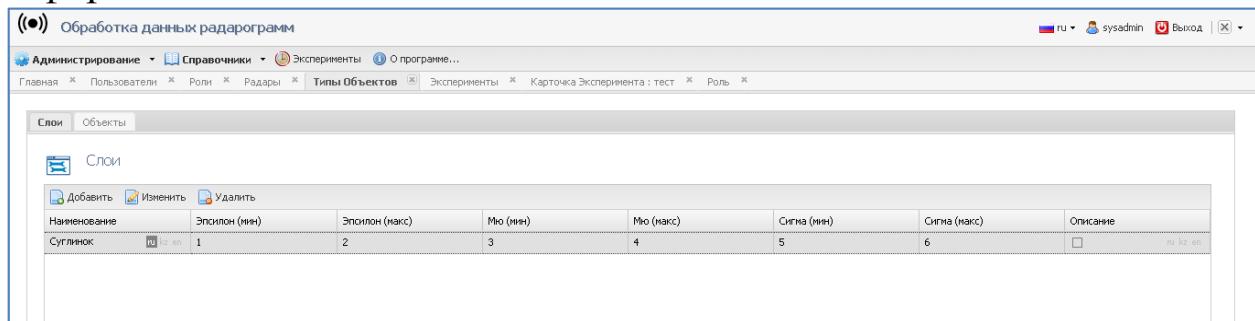


Рисунок Г.3.6 - Справочник «Слои»

Меню «Эксперименты» (см. рисунок Г.3.7) предоставляет доступ к данным, проведенных экспериментов. Для оформления нового эксперимента, необходимо указать его наименование, дату, использованный радар, глубину профиля, длину эксперимента и объекты эксперимента.

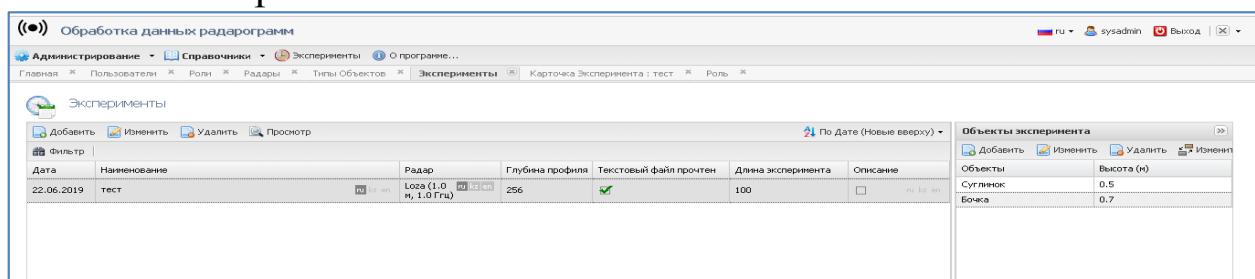


Рисунок Г.3.7 - Эксперименты

Для работы с такими данными необходимо заполнить карточку эксперимента (см.рисунок Г.3.8), импортировав информацию, полученную в ходе эксперимента, из файла.

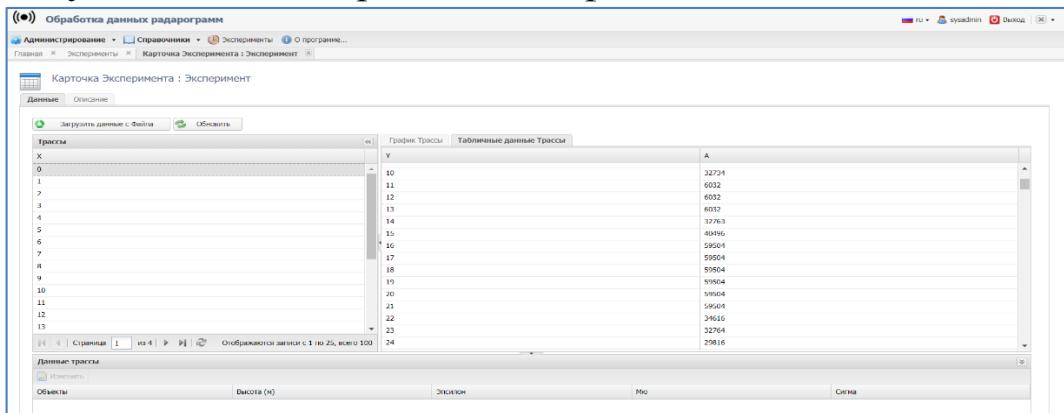


Рисунок Г.3.8 - Карточка эксперимента

Карточка эксперимента имеет функцию сохранения фотоматериала (см. рисунок Г.3.9), полученного в ходе эксперимента, а также построение графиков трасс (см. рисунок Г.3.10).

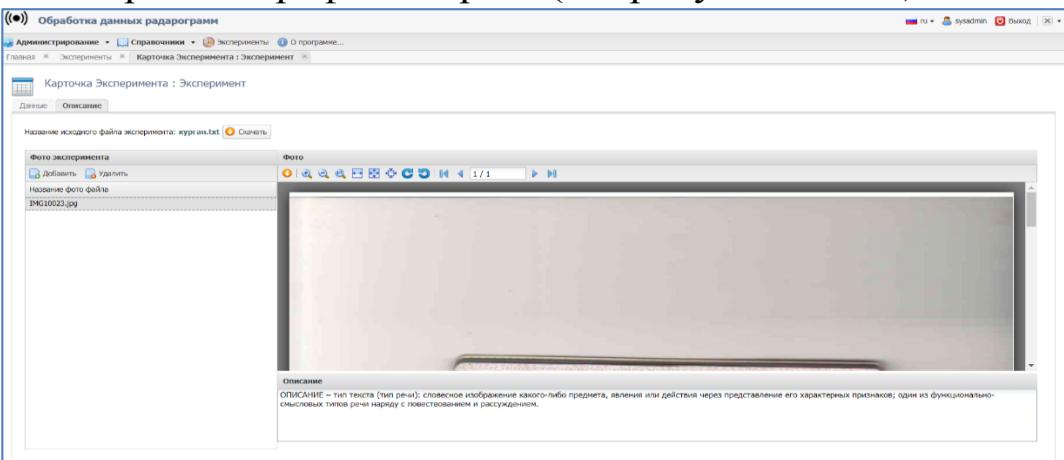


Рисунок Г.3.9 - Карточка эксперимента. Фотоматериалы

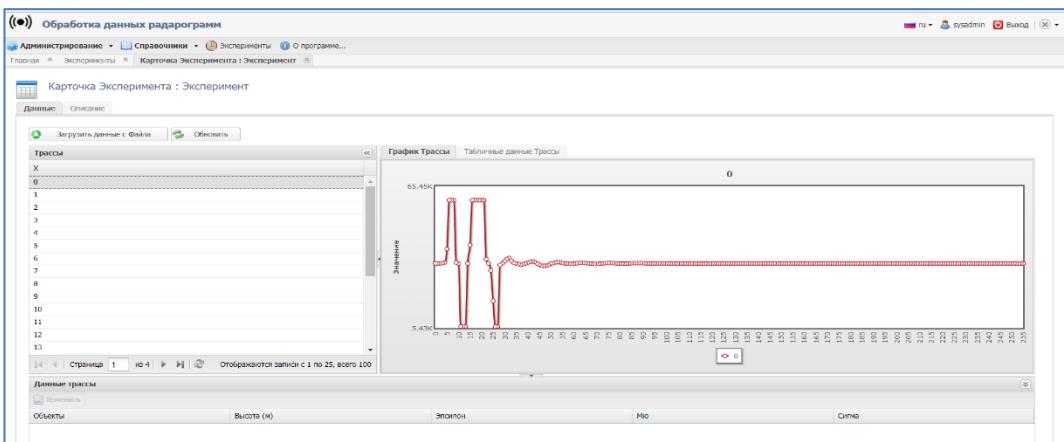


Рисунок Г.3.10 - Карточка эксперимента. График трассы

Приложение Д. Математическая модель обработки сигналов

Раздел 1 Таблица Д.1 – Значение амплитуды (трасса=31_Чистый песок)

Значение амплитуды (трасса=31_Чистый песок)								
№	0	1	2	3	4	5	6	7
Sample s	60	58	58	62	61	57	49	44
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Sample s	43	49	64	87	126	176	236	313
№	16	17	18	19	20	21	22	23
Sample s	417	579	844	1260	1880	2715	3776	5077
№	24	25	26	27	28	29	30	31
Sample s	6626	8389	10245	11832	12604	12459	11900	11368
№	32	33	34	35	36	37	38	39
Sample s	10934	10505	8829	1918	-9940	-20535	-25170	-24334
№	40	41	42	43	44	45	46	47
Sample s	-	-	-	-	-	-	-	-5556
№	20832	17169	15002	14687	15031	14194	10963	
Sample s	48	49	50	51	52	53	54	55
№	602	6042	10172	13080	14791	15080	13068	8246
Sample s	56	57	58	59	60	61	62	63
№	1875	-3852	-7737	-9996	-11183	-11640	-11646	-11468
Sample s	64	65	66	67	68	69	70	71
№	-	-	-	-	-	-	-	-
Sample s	11289	11178	11089	10894	10452	-9647	-8410	-6768
№	72	73	74	75	76	77	78	79
Sample s	-4808	-2641	-391	1836	3855	5512	6746	7551
№	80	81	82	83	84	85	86	87
Sample s	7969	8109	8099	8004	7813	7483	6970	6235
№	88	89	90	91	92	93	94	95

Sample s	5269	4122	2879	1674	657	-132	-718	-1111
Nº	96	97	98	99	100	101	102	103
Sample s	-1349	-1506	-1642	-1764	-1839	-1823	-1673	-1363
Nº	104	105	106	107	108	109	110	111
Sample s	-901	-320	303	916	1430	1784	1967	2012
Nº	112	113	114	115	116	117	118	119
Sample s	2001	2010	2076	2195	2342	2464	2498	2399
Nº	120	121	122	123	124	125	126	127
Sample s	2155	1787	1341	880	446	55	-310	-650
Nº	128	129	130	131	132	133	134	135
Sample s	-947	-1199	-1404	-1545	-1602	-1551	-1380	-1100
Nº	136	137	138	139	140	141	142	143
Sample s	-731	-318	92	446	728	926	1035	1065
Nº	144	145	146	147	148	149	150	151
Sample s	1046	1013	988	987	1016	1067	1126	1177
Nº	152	153	154	155	156	157	158	159
Sample s	1202	1195	1148	1066	960	840	709	576
Nº	160	161	162	163	164	165	166	167
Sample s	441	302	154	3	-148	-290	-417	-514
Nº	168	169	170	171	172	173	174	175
Sample s	-566	-573	-525	-432	-300	-141	21	170
Nº	176	177	178	179	180	181	182	183
Sample s	292	373	415	426	414	396	381	381
Nº	184	185	186	187	188	189	190	191
Sample s	402	444	503	573	650	729	797	845
Nº	192	193	194	195	196	197	198	199

Sample s	870	866	829	760	664	554	443	335
Nº	200	201	202	203	204	205	206	207
Sample s	241	168	123	108	121	150	190	230
Nº	208	209	210	211	212	213	214	215
Sample s	261	277	279	266	242	220	201	194
Nº	216	217	218	219	220	221	222	223
Sample s	198	213	234	250	260	262	256	245
Nº	224	225	226	227	228	229	230	231
Sample s	231	216	203	190	180	171	162	151
Nº	232	233	234	235	236	237	238	239
Sample s	137	125	112	97	85	73	63	58
Nº	240	241	242	243	244	245	246	247
Sample s	57	60	68	83	98	115	127	137
Nº	248	249	250	251	252	253	254	255
Sample s	142	144	142	136	129	126	124	120
Nº	256	257	258	259	260	261	262	263
Sample s	117	117	117	119	120	116	109	101
Nº	264	265	266	267	268	269	270	271
Sample s	89	81	76	79	85	94	105	115
Nº	272	273	274	275	276	277	278	279
Sample s	121	123	123	121	119	117	117	118
Nº	280	281	282	283	284	285	286	287
Sample s	119	119	118	116	118	120	126	136
Nº	288	289	290	291	292	293	294	295
Sample s	143	148	150	148	144	138	137	136
Nº	296	297	298	299	300	301	302	303

Sample s	137	138	139	137	133	129	125	122
Nº	304	305	306	307	308	309	310	311
Sample s	118	114	109	105	101	99	98	98
Nº	312	313	314	315	316	317	318	319
Sample s	98	100	103	102	101	98	94	86
Nº	320	321	322	323	324	325	326	327
Sample s	77	70	62	55	50	47	44	42
Nº	328	329	330	331	332	333	334	335
Sample s	35	28	22	16	6	1	-2	-4
Nº	336	337	338	339	340	341	342	343
Sample s	-5	-7	-9	-13	-19	-24	-28	-33
Nº	344	345	346	347	348	349	350	351
Sample s	-41	-48	-56	-63	-70	-78	-81	-85
Nº	352	353	354	355	356	357	358	359
Sample s	-87	-90	-90	-90	-89	-89	-92	-94
Nº	360	361	362	363	364	365	366	367
Sample s	-97	-101	-106	-107	-107	-109	-109	-109
Nº	368	369	370	371	372	373	374	375
Sample s	-112	-116	-120	-123	-125	-126	-130	-133
Nº	376	377	378	379	380	381	382	383
Sample s	-134	-134	-134	-132	-130	-125	-120	-115
Nº	384	385	386	387	388	389	390	391
Sample s	-113	-112	-112	-109	-109	-109	-108	-106
Nº	392	393	394	395	396	397	398	399
Sample s	-101	-96	-91	-89	-87	-84	-82	-80
Nº	400	401	402	403	404	405	406	407

Sample s	-76	-73	-69	-63	-59	-55	-53	-52
Nº	408	409	410	411	412	413	414	415
Sample s	-51	-49	-47	-47	-46	-44	-43	-42
Nº	416	417	418	419	420	421	422	423
Sample s	-42	-40	-37	-35	-31	-30	-29	-26
Nº	424	425	426	427	428	429	430	431
Sample s	-26	-26	-27	-26	-23	-22	-17	-11
Nº	432	433	434	435	436	437	438	439
Sample s	-5	0	2	2	0	-5	-9	-13
Nº	440	441	442	443	444	445	446	447
Sample s	-19	-24	-24	-27	-30	-35	-44	-51
Nº	448	449	450	451	452	453	454	455
Sample s	-57	-62	-67	-70	-70	-72	-71	-70
Nº	456	457	458	459	460	461	462	463
Sample s	-67	-63	-61	-59	-55	-50	-47	-46
Nº	464	465	466	467	468	469	470	471
Sample s	-49	-51	-56	-60	-63	-68	-74	-79
Nº	472	473	474	475	476	477	478	479
Sample s	-83	-88	-92	-97	-103	-105	-107	-110
Nº	480	481	482	483	484	485	486	487
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	488	489	490	491	492	493	494	495
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	496	497	498	499	500	501	502	503
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	504	505	506	507	508	509	510	511

Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---

Таблица Д.2 – Значение амплитуды (трасса =2 трубы)

Значение амплитуды (трасса=2 трубы)								
№	0	1	2	3	4	5	6	7
Samples	-163	-166	-168	-169	-172	-178	-186	-192
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Samples	-193	-196	-199	-201	-204	-205	-206	-206
№	16	17	18	19	20	21	22	23
Samples	-201	-200	-198	-196	-193	-190	-187	-184
№	24	25	26	27	28	29	30	31
Samples	-182	-179	-177	-175	-172	-173	-172	-170
№	32	33	34	35	36	37	38	39
Samples	-166	-163	-157	-151	-140	-128	-115	-101
№	40	41	42	43	44	45	46	47
Samples	-78	-50	-15	24	70	118	173	244
№	48	49	50	51	52	53	54	55
Samples	337	472	672	960	1345	1763	2165	2540
№	56	57	58	59	60	61	62	63
Samples	2796	2868	2783	2607	2418	2286	2268	2410
№	64	65	66	67	68	69	70	71
Samples	2722	3125	3617	4210	4848	5419	5923	6329
№	72	73	74	75	76	77	78	79
Samples	6567	6617	6450	6018	5321	4427	3357	2130
№	80	81	82	83	84	85	86	87
Samples	843	-474	-1860	-3187	-4452	-5712	-6909	-7908
№	88	89	90	91	92	93	94	95
Samples	-8704	-9320	-9741	-9877	-9727	-9355	-8783	-8013
№	96	97	98	99	100	101	102	103
Samples	-7071	-5982	-4730	-3396	-2069	-731	480	1506
№	104	105	106	107	108	109	110	111
Samples	2443	3230	3897	4407	4751	5034	5273	5443
№	112	113	114	115	116	117	118	119
Samples	5552	5625	5680	5693	5634	5523	5363	5138
№	120	121	122	123	124	125	126	127
Samples	4833	4445	3967	3413	2778	2085	1380	675
№	128	129	130	131	132	133	134	135
Samples	6	-621	-1205	-1715	-2166	-2613	-3070	-3502

Nº	136	137	138	139	140	141	142	143
Samples	-3956	-4482	-5061	-5653	-6299	-7012	-7709	-8324
Nº	144	145	146	147	148	149	150	151
Samples								-
	-8925	-9512	-10018	-10407	-10642	-10692	-10553	10239
Nº	152	153	154	155	156	157	158	159
Samples	-9783	-9214	-8556	-7879	-7204	-6565	-5981	-5479
Nº	160	161	162	163	164	165	166	167
Samples	-5055	-4683	-4344	-4024	-3693	-3322	-2902	-2433
Nº	168	169	170	171	172	173	174	175
Samples	-1934	-1403	-842	-255	334	868	1332	1728
Nº	176	177	178	179	180	181	182	183
Samples	2033	2264	2433	2517	2530	2498	2430	2336
Nº	184	185	186	187	188	189	190	191
Samples	2228	2134	2053	1997	1964	1962	1987	2022
Nº	192	193	194	195	196	197	198	199
Samples	2067	2106	2124	2112	2068	1988	1864	1716
Nº	200	201	202	203	204	205	206	207
Samples	1546	1362	1188	1010	829	667	521	401
Nº	208	209	210	211	212	213	214	215
Samples	314	248	202	181	190	220	264	311
Nº	216	217	218	219	220	221	222	223
Samples	359	398	416	415	388	344	288	218
Nº	224	225	226	227	228	229	230	231
Samples	143	71	8	-47	-88	-105	-94	-56
Nº	232	233	234	235	236	237	238	239
Samples	-2	66	163	267	367	470	577	666
Nº	240	241	242	243	244	245	246	247
Samples	738	794	833	863	888	898	894	884
Nº	248	249	250	251	252	253	254	255
Samples	864	837	811	787	768	749	727	713
Nº	256	257	258	259	260	261	262	263
Samples	709	711	713	718	720	716	707	692
Nº	264	265	266	267	268	269	270	271
Samples	669	640	607	564	520	474	425	373
Nº	272	273	274	275	276	277	278	279
Samples	326	281	241	207	177	150	128	110
Nº	280	281	282	283	284	285	286	287
Samples	95	81	58	33	8	-21	-58	-94
Nº	288	289	290	291	292	293	294	295

Samples	-131	-164	-197	-220	-238	-250	-254	-249
Nº	296	297	298	299	300	301	302	303
Samples	-238	-222	-204	-183	-160	-140	-125	-112
Nº	304	305	306	307	308	309	310	311
Samples	-106	-110	-118	-129	-145	-166	-188	-206
Nº	312	313	314	315	316	317	318	319
Samples	-223	-235	-243	-247	-245	-238	-220	-200
Nº	320	321	322	323	324	325	326	327
Samples	-179	-156	-130	-108	-91	-77	-69	-66
Nº	328	329	330	331	332	333	334	335
Samples	-68	-74	-84	-96	-110	-125	-139	-151
Nº	336	337	338	339	340	341	342	343
Samples	-160	-162	-159	-152	-141	-126	-109	-93
Nº	344	345	346	347	348	349	350	351
Samples	-72	-51	-36	-23	-15	-14	-16	-19
Nº	352	353	354	355	356	357	358	359
Samples	-28	-39	-55	-67	-81	-95	-102	-105
Nº	360	361	362	363	364	365	366	367
Samples	-103	-97	-87	-75	-61	-44	-26	-8
Nº	368	369	370	371	372	373	374	375
Samples	5	16	22	24	22	16	6	-4
Nº	376	377	378	379	380	381	382	383
Samples	-21	-36	-51	-63	-74	-81	-85	-86
Nº	384	385	386	387	388	389	390	391
Samples	-84	-80	-72	-66	-61	-56	-53	-52
Nº	392	393	394	395	396	397	398	399
Samples	-53	-58	-63	-70	-82	-93	-105	-114
Nº	400	401	402	403	404	405	406	407
Samples	-123	-132	-137	-138	-136	-131	-124	-114
Nº	408	409	410	411	412	413	414	415
Samples	-104	-94	-85	-79	-79	-80	-85	-92
Nº	416	417	418	419	420	421	422	423
Samples	-101	-115	-126	-135	-142	-146	-148	-146
Nº	424	425	426	427	428	429	430	431
Samples	-144	-140	-137	-136	-135	-136	-137	-145
Nº	432	433	434	435	436	437	438	439
Samples	-152	-160	-167	-174	-180	-182	-182	-180
Nº	440	441	442	443	444	445	446	447
Samples	-174	-167	-159	-151	-147	-143	-142	-147

Nº	448	449	450	451	452	453	454	455
Samples	-152	-158	-168	-176	-183	-190	-196	-201
Nº	456	457	458	459	460	461	462	463
Samples	-205	-206	-205	-203	-201	-197	-193	-190
Nº	464	465	466	467	468	469	470	471
Samples	-188	-187	-186	-188	-191	-195	-200	-206
Nº	472	473	474	475	476	477	478	479
Samples	-211	-214	-218	-220	-221	-223	-222	-221
Nº	480	481	482	483	484	485	486	487
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	488	489	490	491	492	493	494	495
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	496	497	498	499	500	501	502	503
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	504	505	506	507	508	509	510	511
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Д.3 – Значение амплитуды (трасса =46_1 труба)

Значение амплитуды (трасса =46_1 труба)								
№	0	1	2	3	4	5	6	7
Sample s	-24	-26	-28	-34	-39	-43	-43	-43
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Sample s	-42	-45	-46	-46	-43	-40	-36	-31
№	16	17	18	19	20	21	22	23
Sample s	-24	-17	-10	-3	3	13	22	29
№	24	25	26	27	28	29	30	31
Sample s	35	35	34	33	34	33	34	36
№	32	33	34	35	36	37	38	39
Sample s	37	41	55	73	95	116	141	171
№	40	41	42	43	44	45	46	47
Sample s	202	242	287	332	374	416	464	538
№	48	49	50	51	52	53	54	55
Sample s	679	909	1296	1876	2601	3411	4229	4908
№	56	57	58	59	60	61	62	63
Sample s	5313	5454	5498	5682	6249	7458	9502	12121
№	64	65	66	67	68	69	70	71
Sample s	14932	17471	18937	18851	18027	17189	16504	15866
№	72	73	74	75	76	77	78	79
Sample s	15215	14571	13958	13372	12807	12256	11676	10532
№	80	81	82	83	84	85	86	87
Sample s	7703	3018	-2482	-7739	12450	16993	21147	24625
№	88	89	90	91	92	93	94	95
Sample s	-	-	-	-	-	-	-	-
№	96	97	98	99	100	101	102	103

Sample s	-28398	-26497	-24451	-22255	-20088	-18087	-16313	-14828
Nº	104	105	106	107	108	109	110	111
Sample s	-13631	-12620	-11764	-11047	-10381	-9738	-9042	-8232
Nº	112	113	114	115	116	117	118	119
Sample s	-7336	-6322	-5171	-3942	-2681	-1245	215	1450
Nº	120	121	122	123	124	125	126	127
Sample s	2462	3344	4042	4489	4710	4768	4694	4517
Nº	128	129	130	131	132	133	134	135
Sample s	4309	4116	3964	3874	3850	3850	3876	3914
Nº	136	137	138	139	140	141	142	143
Sample s	3900	3820	3614	3255	2804	2278	1622	907
Nº	144	145	146	147	148	149	150	151
Sample s	237	-402	-1002	-1472	-1785	-1917	-1826	-1530
Nº	152	153	154	155	156	157	158	159
Sample s	-1085	-545	-6	442	796	999	1007	802
Nº	160	161	162	163	164	165	166	167
Sample s	404	-63	-502	-919	-1251	-1392	-1333	-1074
Nº	168	169	170	171	172	173	174	175
Sample s	-593	26	777	1639	2538	3383	4109	4651
Nº	176	177	178	179	180	181	182	183
Sample s	5063	5363	5482	5430	5260	5018	4698	4375
Nº	184	185	186	187	188	189	190	191
Sample s	4079	3858	3726	3686	3749	3899	4125	4426
Nº	192	193	194	195	196	197	198	199
Sample s	4698	4913	5121	5260	5255	5117	4889	4574
Nº	200	201	202	203	204	205	206	207

Sample s	4193	3779	3330	2897	2505	2138	1803	1538
Nº	208	209	210	211	212	213	214	215
Sample s	1361	1248	1205	1215	1266	1361	1471	1579
Nº	216	217	218	219	220	221	222	223
Sample s	1653	1697	1702	1660	1570	1425	1234	1019
Nº	224	225	226	227	228	229	230	231
Sample s	796	585	407	278	203	178	211	307
Nº	232	233	234	235	236	237	238	239
Sample s	445	616	803	983	1147	1283	1387	1437
Nº	240	241	242	243	244	245	246	247
Sample s	1424	1365	1288	1194	1084	965	861	779
Nº	248	249	250	251	252	253	254	255
Sample s	727	705	704	722	761	821	884	929
Nº	256	257	258	259	260	261	262	263
Sample s	958	976	970	937	883	817	734	638
Nº	264	265	266	267	268	269	270	271
Sample s	551	466	390	338	300	274	255	253
Nº	272	273	274	275	276	277	278	279
Sample s	256	261	261	251	228	198	160	114
Nº	280	281	282	283	284	285	286	287
Sample s	58	3	-48	-98	-130	-149	-159	-162
Nº	288	289	290	291	292	293	294	295
Sample s	-147	-119	-81	-43	-9	15	33	45
Nº	296	297	298	299	300	301	302	303
Sample s	48	38	24	9	-10	-37	-65	-86
Nº	304	305	306	307	308	309	310	311

Sample s	-105	-119	-126	-126	-124	-116	-107	-91
Nº	312	313	314	315	316	317	318	319
Sample s	-75	-62	-50	-41	-35	-36	-41	-51
Nº	320	321	322	323	324	325	326	327
Sample s	-67	-85	-101	-115	-129	-144	-157	-164
Nº	328	329	330	331	332	333	334	335
Sample s	-168	-167	-163	-157	-149	-146	-143	-140
Nº	336	337	338	339	340	341	342	343
Sample s	-140	-148	-156	-165	-179	-198	-220	-243
Nº	344	345	346	347	348	349	350	351
Sample s	-266	-290	-313	-334	-353	-370	-384	-390
Nº	352	353	354	355	356	357	358	359
Sample s	-395	-391	-382	-369	-355	-337	-316	-295
Nº	360	361	362	363	364	365	366	367
Sample s	-275	-257	-246	-233	-227	-228	-234	-242
Nº	368	369	370	371	372	373	374	375
Sample s	-251	-259	-265	-274	-280	-281	-276	-271
Nº	376	377	378	379	380	381	382	383
Sample s	-259	-248	-236	-224	-206	-192	-179	-167
Nº	384	385	386	387	388	389	390	391
Sample s	-157	-149	-141	-137	-135	-135	-138	-139
Nº	392	393	394	395	396	397	398	399
Sample s	-143	-149	-157	-163	-164	-161	-157	-155
Nº	400	401	402	403	404	405	406	407
Sample s	-149	-143	-135	-129	-121	-121	-120	-124
Nº	408	409	410	411	412	413	414	415

Sample s	-131	-138	-146	-154	-159	-161	-159	-154
Nº	416	417	418	419	420	421	422	423
Sample s	-148	-139	-129	-117	-106	-97	-91	-85
Nº	424	425	426	427	428	429	430	431
Sample s	-85	-88	-95	-101	-107	-114	-122	-124
Nº	432	433	434	435	436	437	438	439
Sample s	-124	-118	-109	-92	-71	-44	-22	-3
Nº	440	441	442	443	444	445	446	447
Sample s	15	32	44	50	52	50	45	40
Nº	448	449	450	451	452	453	454	455
Sample s	37	35	35	37	40	48	59	75
Nº	456	457	458	459	460	461	462	463
Sample s	89	103	117	131	142	148	151	151
Nº	464	465	466	467	468	469	470	471
Sample s	150	143	135	124	115	104	95	88
Nº	472	473	474	475	476	477	478	479
Sample s	85	83	80	80	83	85	84	86
Nº	480	481	482	483	484	485	486	487
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	488	489	490	491	492	493	494	495
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	496	497	498	499	500	501	502	503
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	504	505	506	507	508	509	510	511
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Д.4 – Значение амплитуды (трасса =68_Соляной купол)

Значение амплитуды (трасса =68_Соляной купол)								
№	0	1	2	3	4	5	6	7
Samples	-132	-137	-139	-141	-141	-139	-137	-162
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Samples	-156	-149	-144	-140	-131	-122	-111	-101
№	16	17	18	19	20	21	22	23
Samples	-89	-79	-68	-57	-48	-39	-33	-29
№	24	25	26	27	28	29	30	31
Samples	-25	-23	-26	-32	-39	-48	-59	-67
№	32	33	34	35	36	37	38	39
Samples	-77	-83	-86	-85	-79	-70	-54	-31
№	40	41	42	43	44	45	46	47
Samples	0	35	85	153	236	338	466	619
№	48	49	50	51	52	53	54	55
Samples	811	1075	1434	1907	2482	3179	4070	513
№	56	57	58	59	60	61	62	63
Samples	6210	7299	8417	9337	9780	9680	9286	886
№	64	65	66	67	68	69	70	71
Samples	8505	8166	7828	7497	7177	6871	6575	628
№	72	73	74	75	76	77	78	79
Samples	6014	5749	5491	5245	5007	4777	4369	147
№	80	81	82	83	84	85	86	87
Samples	-7340	-20159	-32011	-32767	-32767	-32767	-32767	-327
№	88	89	90	91	92	93	94	95
Samples	-	-	-	-	-	-	-	-
№	96	97	98	99	100	101	102	103
Samples	-	-	-	-	-	-	-	-
№	104	105	106	107	108	109	110	111
Samples	5368	5176	4440	3517	2652	1879	1398	135
								2

Nº	112	113	114	115	116	117	118	119
Samples	1725	2562	3906	5554	7568	10100	13034	15869
Nº	120	121	122	123	124	125	126	127
Samples	18309	20167	20996	20694	19852	19028	18329	17662
Nº	128	129	130	131	132	133	134	135
Samples	16989	16328	15696	15090	14504	13935	13381	12486
Nº	136	137	138	139	140	141	142	143
Samples	9934	5193	-695	-5939	10083	13610	16504	-18524
Nº	144	145	146	147	148	149	150	151
Samples	-	-	-	-	-	-	-	-100
	19638	19901	19437	18355	16734	14720	12425	54
Nº	152	153	154	155	156	157	158	159
Samples	-7701	-5336	-3152	-1343	147	1322	2082	2408
Nº	160	161	162	163	164	165	166	167
Samples	2386	2109	1628	1022	402	-157	-594	-856
Nº	168	169	170	171	172	173	174	175
Samples	-914	-757	-358	212	944	1824	2744	3667
Nº	176	177	178	179	180	181	182	183
Samples	4633	5534	6280	6915	7416	7748	7933	7981
Nº	184	185	186	187	188	189	190	191
Samples	7917	7777	7558	7272	6939	6579	6219	5859
Nº	192	193	194	195	196	197	198	199
Samples	5520	5200	4863	4493	4126	3760	3379	3000
Nº	200	201	202	203	204	205	206	207
Samples	2592	2174	1768	1386	1018	642	291	-12
Nº	208	209	210	211	212	213	214	215

Samples								-1270
	-278	-516	-726	-891	-1030	-1141	-1219	
Nº	216	217	218	219	220	221	222	223
Samples								-1527
	-1304	-1336	-1354	-1373	-1410	-1459	-1492	
Nº	224	225	226	227	228	229	230	231
Samples								-1160
	-1567	-1593	-1595	-1579	-1527	-1438	-1320	
Nº	232	233	234	235	236	237	238	239
Samples	-949	-712	-469	-218	47	312	549	766
Nº	240	241	242	243	244	245	246	247
Samples								1331
	965	1107	1201	1273	1315	1322	1321	
Nº	248	249	250	251	252	253	254	255
Samples								1733
	1344	1357	1381	1433	1509	1584	1651	
Nº	256	257	258	259	260	261	262	263
Samples								1558
	1829	1904	1944	1951	1916	1837	1714	
Nº	264	265	266	267	268	269	270	271
Samples	1375	1158	933	715	492	283	111	-28
Nº	272	273	274	275	276	277	278	279
Samples	-132	-196	-233	-246	-242	-229	-214	-204
Nº	280	281	282	283	284	285	286	287
Samples	-207	-225	-260	-318	-388	-455	-523	-595
Nº	288	289	290	291	292	293	294	295
Samples	-655	-700	-727	-729	-710	-672	-621	-557
Nº	296	297	298	299	300	301	302	303
Samples	-491	-437	-391	-349	-321	-311	-316	-333
Nº	304	305	306	307	308	309	310	311
Samples	-362	-399	-441	-481	-518	-546	-559	-559
Nº	312	313	314	315	316	317	318	319
Samples	-542	-510	-455	-392	-323	-249	-166	-87
Nº	320	321	322	323	324	325	326	327
Samples	-19	40	88	127	148	155	148	125
Nº	328	329	330	331	332	333	334	335
Samples	86	44	-2	-48	-89	-123	-152	-170

Nº	336	337	338	339	340	341	342	343
Samples	-178	-174	-162	-142	-119	-92	-58	-25
Nº	344	345	346	347	348	349	350	351
Samples	0	19	28	27	18	0	-24	-56
Nº	352	353	354	355	356	357	358	359
Samples	-90	-126	-161	-191	-216	-231	-238	-235
Nº	360	361	362	363	364	365	366	367
Samples	-221	-200	-174	-147	-122	-100	-79	-64
Nº	368	369	370	371	372	373	374	375
Samples	-60	-66	-76	-92	-109	-134	-163	-190
Nº	376	377	378	379	380	381	382	383
Samples	-214	-234	-248	-255	-255	-251	-240	-227
Nº	384	385	386	387	388	389	390	391
Samples	-211	-194	-178	-166	-156	-150	-150	-153
Nº	392	393	394	395	396	397	398	399
Samples	-160	-170	-185	-201	-215	-228	-241	-251
Nº	400	401	402	403	404	405	406	407
Samples	-257	-259	-258	-250	-240	-227	-213	-200
Nº	408	409	410	411	412	413	414	415
Samples	-187	-177	-173	-171	-176	-186	-200	-214
Nº	416	417	418	419	420	421	422	423
Samples	-232	-251	-267	-279	-286	-289	-286	-275
Nº	424	425	426	427	428	429	430	431
Samples	-261	-243	-224	-203	-182	-165	-151	-144
Nº	432	433	434	435	436	437	438	439
Samples	-145	-149	-155	-166	-173	-182	-191	-199
Nº	440	441	442	443	444	445	446	447
Samples	-202	-200	-191	-181	-171	-158	-144	-132
Nº	448	449	450	451	452	453	454	455
Samples	-119	-112	-107	-104	-105	-109	-114	-121
Nº	456	457	458	459	460	461	462	463
Samples	-123	-124	-125	-122	-115	-106	-95	-80
Nº	464	465	466	467	468	469	470	471
Samples	-68	-55	-44	-37	-33	-32	-38	-46
Nº	472	473	474	475	476	477	478	479
Samples	-58	-73	-93	-110	-125	-137	-146	-150
Nº	480	481	482	483	484	485	486	487
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	488	489	490	491	492	493	494	495

Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
№	496	497	498	499	500	501	502	503
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0
№	504	505	506	507	508	509	510	511
Samples	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Д. 5 – Значение амплитуды (трасса =112_Металлический лист)

Значение амплитуды (трасса=112_Металлический лист)								
№	0	1	2	3	4	5	6	7
Sample s	-129	-127	-119	-101	-81	-60	-43	-27
№	8	9	10	11	12	13	14	15
Sample s	-16	-7	-1	6	21	43	72	109
№	16	17	18	19	20	21	22	23
Sample s	162	244	380	579	821	1093	1431	1927
№	24	25	26	27	28	29	30	31
Sample s	2714	3866	5332	6958	8429	9500	10292	11097
№	32	33	34	35	36	37	38	39
Sample s	1182							
№	4	12028	11676	11137	10657	9931	7164	952
№	40	41	42	43	44	45	46	47
Sample s	-7326	14995	20116	22405	22171	19792	15867	11269
№	48	49	50	51	52	53	54	55
Sample s	-6908	-3550	-1611	-1182	-2177	-4237	-6671	-8638
№	56	57	58	59	60	61	62	63
Sample s	-9321	-8269	-5609	-1958	1907	5173	7168	7691
№	64	65	66	67	68	69	70	71
Sample s	7002	5547	3740	1867	2	-1760	-3261	-4413
№	72	73	74	75	76	77	78	79
Sample s	-5208	-5630	-5652	-5293	-4677	-4013	-3514	-3311

Nº	80	81	82	83	84	85	86	87
Sample s	-3395	-3630	-3835	-3822	-3459	-2737	-1770	-734
Nº	88	89	90	91	92	93	94	95
Sample s	206	914	1329	1497	1526	1579	1815	2301
Nº	96	97	98	99	100	101	102	103
Sample s	2985	3685	4176	4349	4245	3987	3699	3480
Nº	104	105	106	107	108	109	110	111
Sample s	3377	3374	3400	3369	3199	2830	2260	1551
Nº	112	113	114	115	116	117	118	119
Sample s	787	70	-482	-808	-935	-947	-922	-915
Nº	120	121	122	123	124	125	126	127
Sample s	-957	-1037	-1100	-1085	-952	-696	-341	67
Nº	128	129	130	131	132	133	134	135
Sample s	460	773	974	1057	1037	957	875	835
Nº	136	137	138	139	140	141	142	143
Sample s	858	954	1094	1231	1322	1332	1248	1071
Nº	144	145	146	147	148	149	150	151
Sample s	827	561	313	126	13	-39	-47	-35
Nº	152	153	154	155	156	157	158	159
Sample s	-32	-67	-144	-242	-349	-435	-470	-437
Nº	160	161	162	163	164	165	166	167
Sample s	-354	-241	-126	-25	50	98	104	77
Nº	168	169	170	171	172	173	174	175
Sample s	45	34	49	96	172	261	348	415
Nº	176	177	178	179	180	181	182	183
Sample s	443	426	374	306	236	187	167	171
Nº	184	185	186	187	188	189	190	191

Sample s	190	207	212	192	148	90	26	-30
Nº	192	193	194	195	196	197	198	199
Sample s	-64	-67	-44	-3	36	71	95	109
Nº	200	201	202	203	204	205	206	207
Sample s	120	137	165	201	248	295	335	365
Nº	208	209	210	211	212	213	214	215
Sample s	378	381	375	367	356	351	351	358
Nº	216	217	218	219	220	221	222	223
Sample s	363	361	350	333	310	289	270	263
Nº	224	225	226	227	228	229	230	231
Sample s	264	271	273	273	272	268	261	256
Nº	232	233	234	235	236	237	238	239
Sample s	258	259	257	255	250	242	238	233
Nº	240	241	242	243	244	245	246	247
Sample s	233	236	239	239	236	234	233	230
Nº	248	249	250	251	252	253	254	255
Sample s	229	228	227	221	214	207	201	195
Nº	256	257	258	259	260	261	262	263
Sample s	188	182	177	174	168	160	152	143
Nº	264	265	266	267	268	269	270	271
Sample s	134	126	121	118	117	117	113	108
Nº	272	273	274	275	276	277	278	279
Sample s	100	88	74	62	51	42	37	33
Nº	280	281	282	283	284	285	286	287
Sample s	29	19	10	1	-9	-13	-13	-14
Nº	288	289	290	291	292	293	294	295

Sample s	-15	-16	-17	-24	-39	-53	-57	-48
Nº	296	297	298	299	300	301	302	303
Sample s	-41	-39	-43	-44	-49	-54	-57	-59
Nº	304	305	306	307	308	309	310	311
Sample s	-63	-67	-68	-64	-64	-63	-65	-66
Nº	312	313	314	315	316	317	318	319
Sample s	-63	-62	-60	-60	-56	-52	-47	-45
Nº	320	321	322	323	324	325	326	327
Sample s	-43	-42	-41	-42	-41	-37	-33	-26
Nº	328	329	330	331	332	333	334	335
Sample s	-20	-19	-20	-23	-23	-19	-13	-5
Nº	336	337	338	339	340	341	342	343
Sample s	1	6	9	7	7	6	6	8
Nº	344	345	346	347	348	349	350	351
Sample s	10	10	12	13	13	14	16	17
Nº	352	353	354	355	356	357	358	359
Sample s	18	18	20	24	27	30	33	37
Nº	360	361	362	363	364	365	366	367
Sample s	41	42	40	40	40	41	43	43
Nº	368	369	370	371	372	373	374	375
Sample s	42	39	36	30	23	18	14	13
Nº	376	377	378	379	380	381	382	383
Sample s	12	11	9	6	3	2	2	1
Nº	384	385	386	387	388	389	390	391
Sample s	1	0	-3	-5	-6	-11	-15	-17
Nº	392	393	394	395	396	397	398	399

Sample s	-19	-23	-28	-30	-32	-36	-43	-46
Nº	400	401	402	403	404	405	406	407
Sample s	-46	-48	-53	-55	-56	-59	-63	-66
Nº	408	409	410	411	412	413	414	415
Sample s	-68	-72	-77	-79	-81	-83	-87	-93
Nº	416	417	418	419	420	421	422	423
Sample s	-91	-90	-91	-89	-91	-93	-87	-86
Nº	424	425	426	427	428	429	430	431
Sample s	-89	-92	-94	-92	-90	-89	-85	-84
Nº	432	433	434	435	436	437	438	439
Sample s	-83	-80	-82	-84	-85	-82	-74	-66
Nº	440	441	442	443	444	445	446	447
Sample s	-61	-57	-54	-52	-51	-50	-51	-55
Nº	448	449	450	451	452	453	454	455
Sample s	-62	-64	-64	-63	-66	-70	-70	-69
Nº	456	457	458	459	460	461	462	463
Sample s	-68	-65	-62	-58	-53	-50	-46	-42
Nº	464	465	466	467	468	469	470	471
Sample s	-42	-41	-39	-38	-34	-28	-26	-22
Nº	472	473	474	475	476	477	478	479
Sample s	-17	-13	-11	-12	-12	-14	-16	-18
Nº	480	481	482	483	484	485	486	487
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	488	489	490	491	492	493	494	495
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	496	497	498	499	500	501	502	503

Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0
Nº	504	505	506	507	508	509	510	511
Sample s	0	0	0	0	0	0	0	0

Приложение Е. Фототчет экспедиций

Экспедиция в составе профессора Евразийского национального университета имени Л.Н Гумилева Исакова К.Т. и старшего преподавателя Казахского национального педагогического университета имени Абая Шолпанбаева Б.Б., 4 января 2019 года провели экспериментальные исследования на песчаном карьере «ТОО Бек», находящейся в 30 км. от города Алматы по направлению в сторону г. Капчагая. Использован георадар серии Лоза-В. Задачи исследования: определение спектральных характеристик сигналов, излучаемых антеннами: 0.5 м, 1 м, 1.5 м., 3 метра; интерпретация серии радарограмм, полученных в результате зондирования, необходимых для решения обратных задач по восстановлению источника.



Рисунок Е.1.1 – Члены экспедиций профессор Исаков К.Т. и ст. преподаватель Шолпанбаева Б.Б



Рисунок Е.1.2 – Измерение георадаром серии «Лоза-В»



Рисунок Е.1.3 – Экспериментальные исследования на песчаном карьере
«ТОО Бек»

2 Фототчет экспедиции песчаный карьер ТОО «Нурсат». Прибор Лоза-В

Экспедиция в составе профессора ЕНУ имени Л.Н Гумилева Исакова К.Т. и доктор РНД, доцент КазНПУ имени Абая Шолпанбаева Б.Б., докторанта 2 курса Токсейт Д.К. и магистрант Кембай А. 19-20мая 2019 года провели эксперименты на песчаном карьере ТОО «Даур», находящейся в 68 км. от города Нур-Султан в Кургальджинской трассе.

На новом лабораторном полигоне (песчаный карьер - ТОО «Нурсат»), эксперимент выполнен геофизическим комплексом Лоза, антенной 50 см. Основная подготовка результатов исследования осуществляется с помощью специализированной программы «КРОТ».



Рисунок Е.2.1 - Однородная среда – «чистый песок



Рисунок Е.2.2 – Подготовка участка для измерения георадаром

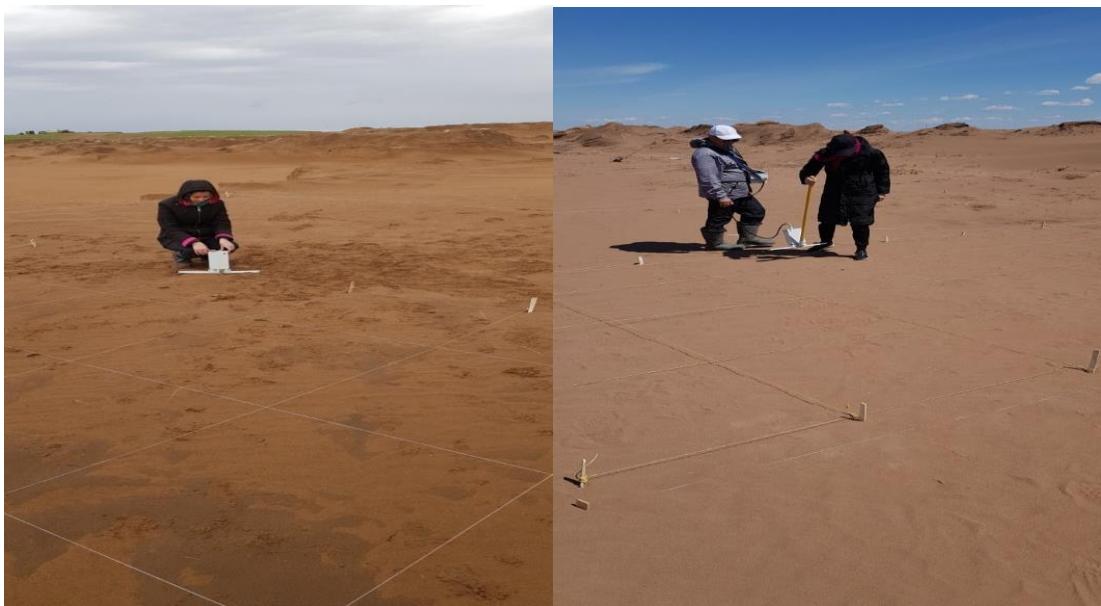


Рисунок Е.2.3 – Подготовка объекта «Купол соли»

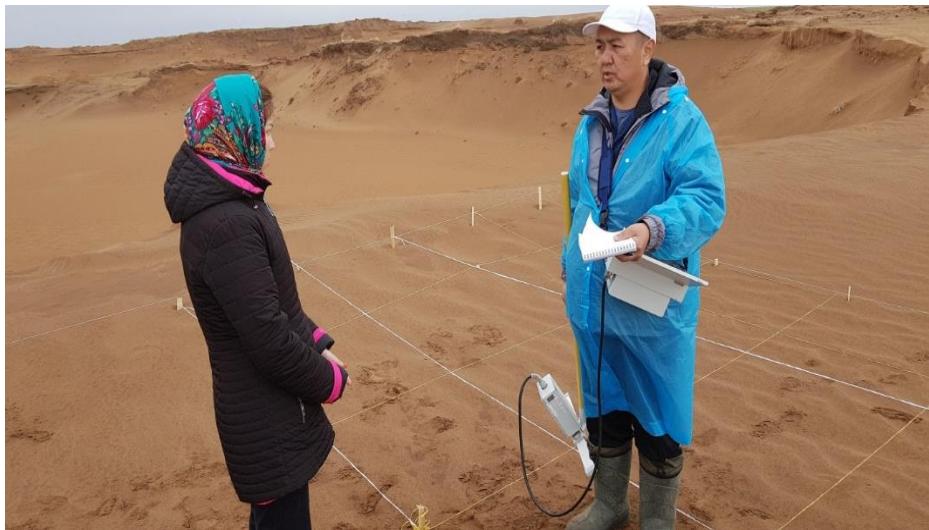


Рисунок Е.2.4 – Члены экспедиций: доцент КазНПУ имени Абая Шолпанбаева Б.Б., докторанта 2 курса Токсейт Д.К.

3 Фототчет экспедиции песчаный карьер ТОО «Нурсат». Прибор Зонд-12

9 мая 2019 года на песчаном карьере ТОО «Даур», находящейся в 68 км. от города Нур-Султан по Кургальджинской трассе были проведены георадарные работы на учебных моделях. В эксперименте участвовали: профессор ЕНУ им. Л.Н. Гумилева Искаков К.Т., Московский физико-технический институт Баранчук К.И., докторанты первого курса ЕНУ им. Л.Н. Гумилева Омарханова Д.Ж., Азиева Н.Т., Муканова Ж.А., магистрант Кембай А. В экспериментах использовался радарный комплекс «Зонд-12е» с антенной 300мГц, которая подходит для поставленных задач, как по размеру исследуемых объектов, так и по среде, в которой они находятся. Основная подготовка результатов исследования осуществляется с помощью специализированной программы “Prism2”. Программный пакет “Prism2” предназначен для работы в полевых условиях в составе георадара “Zond-12е”, а также в лабораторных условиях при обработке и интерпретации данных радиолокационного зондирования.

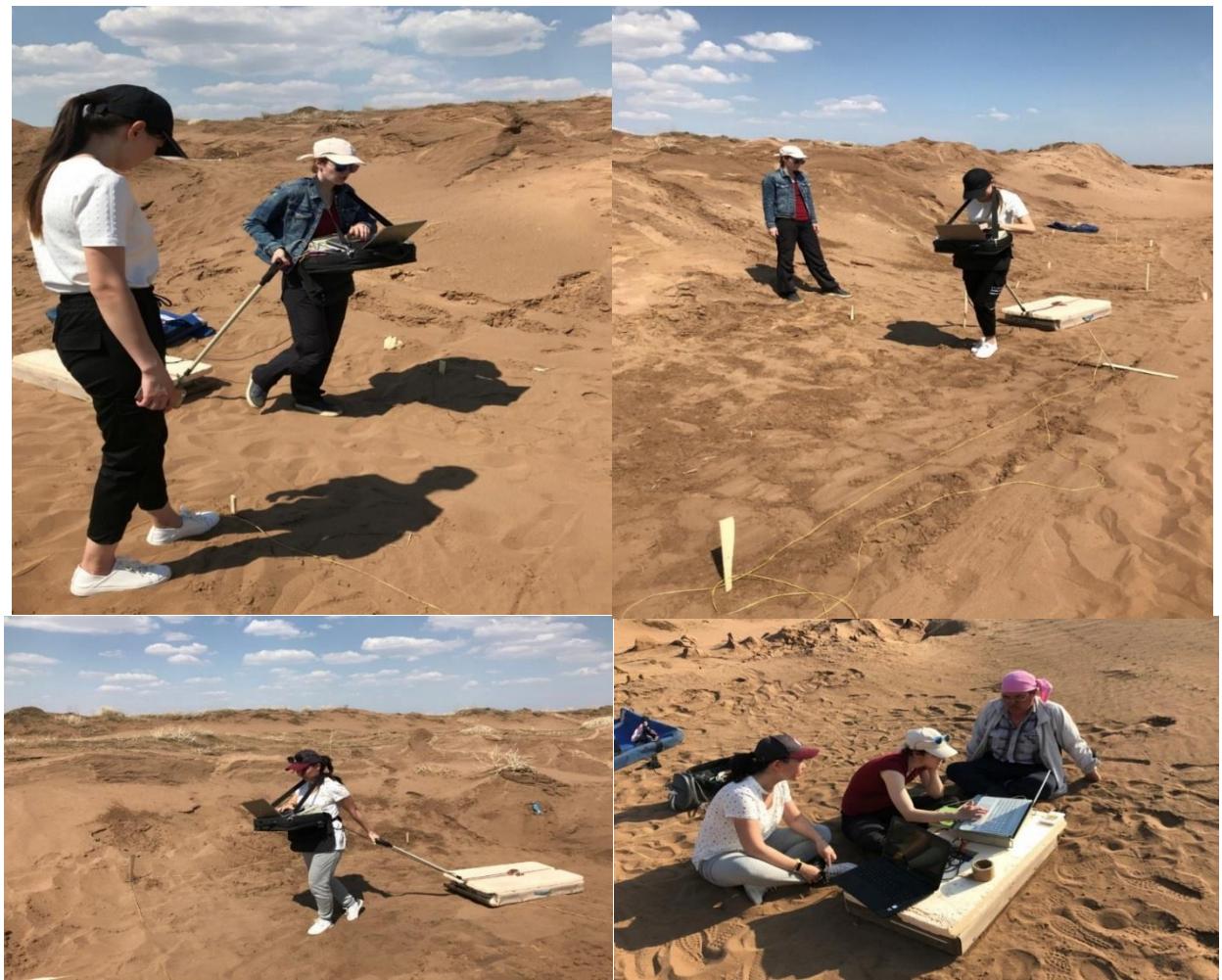


Рисунок Е.3.1 – экспедиция песчаный карьер ТОО «Нурсат». Измерения прибором Зонд-12

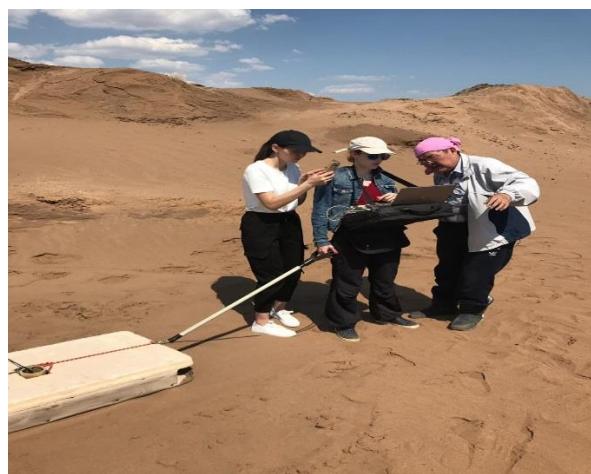


Рисунок Е.3.2 – Члены экспедиций: профессор ЕНУ им. Л.Н. Гумилева Исаков К.Т., Московский физико-технический институт Баранчук К.И., магистрант Кембай А.

4 Фототчет экспедиции песчаный карьер ТОО «Жер». Прибор Каппаметр ПИМВ – 32

Экспедиция в составе профессора Атанова С.К., с учениками, провели экспериментальные исследования на полигоне «Жер», находящиеся в 76 км от города Нур-Султан, по направлению села Ахмет аул. Сопоставления изучения магнитной восприимчивости χ по данным скважинной магнитометрии и по керну были получены с использованием каппаметра прибора ПИМВ-32. Данный прибор позволяет определять магнитную восприимчивость образцов в интервале измерения $(2/1\ 000\ 000)*10^{-6}$ ед. СГСМ с точностью 5%.

На рисунке Н.4.1 профессор Атанов С.К. и магистрант Абдулла Н, подготовка прибора ПИМВ -32 к измерениям.

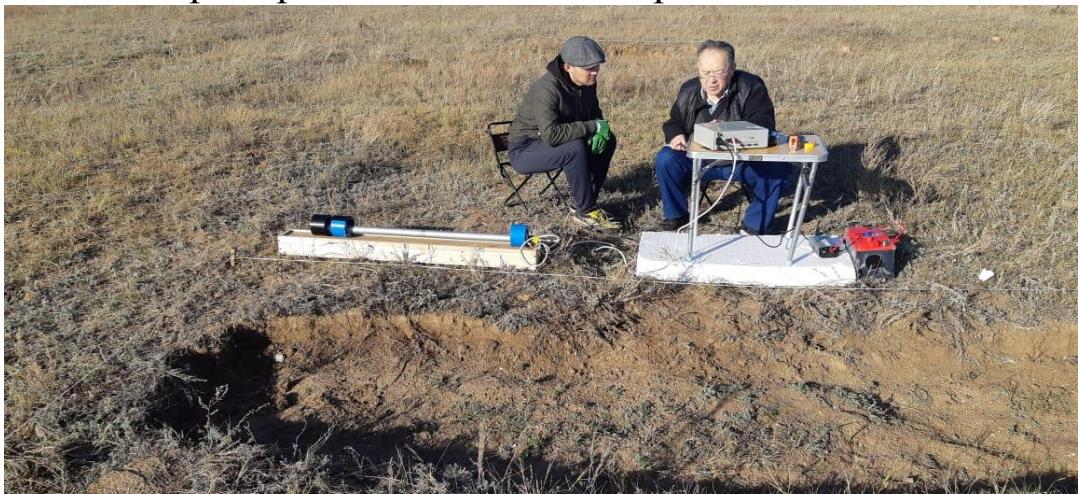


Рисунок Е.4.1 – профессор Атанов С.К. и магистрант Абдулла Н, подготовка прибора ПИМВ -32 к измерениям

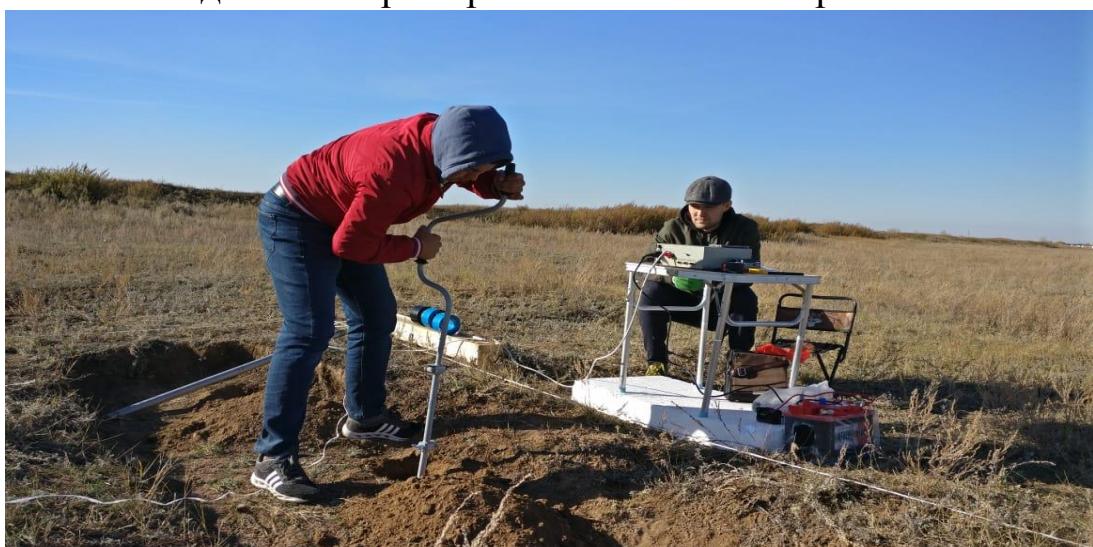


Рисунок Е.4.2 – Бурение ручным способом. Снятие образцов для исследования



Рисунок Е.4.3 – процесс измерения и завершения бурения ручным способом



Рисунок Е.4.4 – Проведение измерений в лабораторных условиях

Определение магнитной восприимчивости образцов сред. На рисунке Е.4.5 сотрудники проекта: профессор Атанов С.К., и м.н.с Нуржанова А.Б., за работой с прибором ПИМВ – 32.

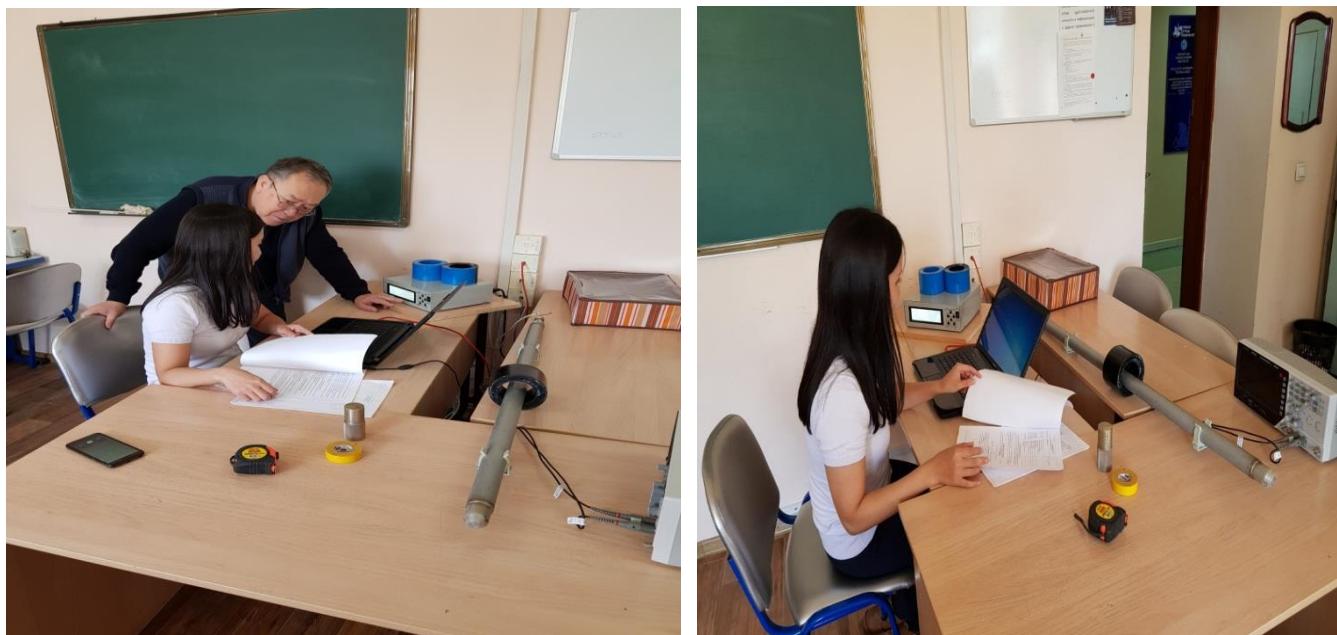


Рисунок Е.4.5 – Сотрудники проекта: профессор Атанов С.К., и м.н.с Нуржанова А., за работой с прибором ПИМВ – 32

*К.Т. Исаков, Д.К. Токсейт, С.А. Боранбаев, С.К. Атанов,
Ж.О. Оралбекова, А. Нуржанова*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РУКОВОДСТВО ПО
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ**

Типография не несет ответственности за содержание

Сдана в печать 2020 г.
Напечатано 2020 г. Тираж 20 экз.
Формат 60x84 1/16 Объем усл. 14 п.л.
Бумага офсетная Шрифт «Times New Roman»
Заказ №

Отпечатано в типографии национального университета
ЕНУ им.Л.Н.Гумилева

г.Нур-Султан, 010008, ул.Кажымукана, 11