

На правах рукописи

Гулевич Оксана Александровна

**ИМПУЛЬСНОЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ
СРЕД С ДИСПЕРСИЕЙ**

Специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук.

Научный руководитель:

Профессор, доктор физико-математических наук

Деминов Марат Гарунович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук

Официальные оппоненты:

Профессор, доктор физико-математических наук

Каринский Александр Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», кафедра Геофизики Геофизического факультета, профессор

Профессор, доктор технических наук

Гринев Александр Юрьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Факультет «Радиоэлектроника летательных аппаратов», кафедра «Радиофизика, антенны и микроволновая техника», профессор

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН)

Защита состоится 15 октября 2015 года в 16 час. на заседании Диссертационного Совета Д 501.001.63 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, аудитория СФА.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте www.phys.u.ru

Автореферат разослан 30 июля 2015г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

В.Б. Смирнов

Общая характеристика работы

Предметом диссертационной работы являются свойства сверхширокополосных импульсов радиоволн в природных и техногенных средах с дисперсией и электрофизические характеристики сред, получаемые по данным георадаров на основе анализа этих свойств.

Актуальность проблемы

Повышение глубины зондирования и увеличение разрешающей способности методов дистанционного исследования природных и техногенных сред, их внутренней структуры и включений не теряет своей актуальности много лет. Среди известных геофизических методов наиболее универсальными, информативными, экологически чистыми и определяющими перспективу развития морской, сухопутной и скважинной геологоразведки являются волновые методы: сейсмическое и электромагнитное зондирование. От других геофизических методов оба эти метода отличаются высокой пространственной информативностью и структурой получаемых данных.

На практике, в георадиолокации, в исследуемую среду передающей антенной посылается электромагнитный импульс, а приемной антенной воспринимается отклик среды – совокупность волн, отличающихся друг от друга временами пробега, интенсивностью и формой. В характеристиках этих волн и содержится практически вся существенная информация о среде, которую можно получить с помощью электромагнитного зондирования. Для георадиолокации это удвоенные времена пробега электромагнитных волн до границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью, информация о потерях, связанных с токами проводимости, информация о дисперсии фазовых скоростей в среде.

Кинематика и динамика волнового поля и для электромагнитных волн, и для упругих волн описывается волновым уравнением. При интерпретации результатов наблюдений часто применяются одни и те же кинематические

модели среды. В процессе измерений определяется время задержек, которое для упругих волн, используемых в сейсмическом зондировании измеряется и имеет порядок миллисекунд, а для георадиолокации - наносекунд. Временные масштабы процессов получения информации сейсмического и георадиолокационного зондирования отличаются примерно в миллион раз и требуют разной по быстрдействию элементной базы для регистрации и обработки сигналов. Вместе с прогрессом в силовой электронике и микроэлектронике в последние десятилетия быстро развивается наиболее информативный среди всех методов электромагнитного зондирования, обеспечивающий получение наиболее полной и качественной информации о среде - метод георадиолокации.

Объектами приложения современных технологий электромагнитного зондирования являются практически все природные и искусственные среды с низким, умеренным и значительным поглощением электромагнитных волн: гранит, кварцит, известняк, гипс, песчаные грунты, базальты, граниты, суглинки с низкой влажностью, влажные глины, водные объекты, ледники. Также инженерные сооружения (железные и автомобильные дороги, тоннели, бетонные и железобетонные конструкции, жилые и промышленные здания); месторождения твёрдых и флюидообразных полезных ископаемых (нефти, газогидратов и пр.) находящиеся в различных климатических зонах и гидрогеологических условиях, включая вечную мерзлоту.

Важнейшее значение для расширения применения георадиолокации в практике имеет гарантированная глубина зондирования для всех, встречающихся в практике, гидрогеологических условий. Современные георадары позволяют зондировать на глубину 50-150 метров даже высокопроводящие среды.

Амплитуда и форма отраженного импульса зависят от многих факторов, среди которых можно выделить амплитуду и форму начального импульса,

излучаемого антенной, изменение амплитуды и формы сигнала при распространении и изменение амплитуды и формы при отражении импульса. Вопросам изменения амплитуды и формы сигнала при распространении и отражении посвящено большое число работ [1,2,3], в которых учитывается, в частности, трехмерная геометрия реальной ситуации, однако в них не учитывается сверхширокополосность импульса. Работы по учёту диэлектрической проницаемости реальных сред, обладающих частотной дисперсией на процессы отражения и рассеяния сверхширокополосных импульсных сигналов проводились в Институте нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН [4] применительно к слоистой среде нефтегазового коллектора. При этом механизм формирования диэлектрической проницаемости среды под действием импульсного источника не рассматривался.

В георадиолокации развиваются два подхода к формированию зондирующего импульса. В одном используются различные квазимонохроматические сигналы, в другом короткие, сверхширокополосные импульсы. Сверхширокополосным считают сигнал, полоса частот которого сопоставима с максимальной частотой его спектра. Описание процессов распространения квазимонохроматических сигналов в приближении геометрической оптики проще и нагляднее и, в абсолютном большинстве опубликованных работ, среда распространения сигнала описывается комплексной диэлектрической проницаемостью с простой зависимостью от частоты излучения ω [5]:

$$\varepsilon(\omega, \mathbf{r}) = \varepsilon_0(\mathbf{r}) + i\sigma(\mathbf{r})/\omega \quad (1)$$

где $\sigma(\mathbf{r})$ – проводимость среды в точке с координатами $\mathbf{r}=\{x,y,z\}$. Для описания распространения коротких сверхширокополосных импульсов такой подход представляется слишком упрощённым по многим причинам. Одна из них связана с тем, что в сверхширокополосной импульсной георадиолокации

характерные времена поляризации часто оказываются близкими к характерным временам зондирующих импульсов [6]. Тем не менее, ранее не было дано даже приближенных (модельных) оценок возможного влияния формирующейся дисперсии на свойства электромагнитных импульсов. Поэтому актуальной является проблема учета дисперсии реальных сред в задачах сверхширокополосной импульсной георадиолокации с целью повышения ее точности и информативности. Стоит отметить, что использование сверхширокополосных импульсов достаточно перспективно, так как технически такой импульс легче возбуждать, при этом амплитуда сверхширокополосного импульса может в 10-1000 раз превышать достигаемые на практике амплитуды квазимонохроматических сигналов [7,8].

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями диссертационной работы являются исследование свойств эволюции зондирующего сверхширокополосного импульса в диспергирующих средах для различных приближенных моделей электрической поляризации этих сред, получение первых обоснований важности учета этой дисперсии на основе качественного сопоставления результатов моделирования с экспериментом, оценка эффективности метода сверхширокополосной импульсной георадиолокации на конкретных экспериментальных данных.

Для достижения этих целей ставились следующие задачи:

1. На основе моделирования оценить изменения амплитуды и формы сверхширокополосного импульсного сигнала в идеальном диэлектрике для трех распространенных в природе видов диэлектрической поляризации (электронной, дипольной (ориентационной) и дипольной с инерцией) и в диэлектрике с учетом проводимости.

2. Выполнить качественное сопоставление этих оценок с экспериментальными данными для получения первых результатов о

целесообразности учета дисперсии в задачах сверхширокополосной импульсной георадиолокации.

3. Оценить возможности использования современных импульсных георадаров для анализа реальных сред в различных гидрогеологических условиях на основе сопоставления данных георадаров с данными, полученными другими методами.

Научная новизна

Основные результаты диссертации получены впервые. К ним относятся:

1. Получены точные решения задачи распространения сверхширокополосного импульсного сигнала в однородном диэлектрике в одномерном приближении для трех распространенных в природе моделей диэлектрической проницаемости. Они представлены в виде интегралов от параметров среды и начальных характеристик сигнала, которые решались численно.

2. На основе этих решений и качественного сопоставления с экспериментальными данными даны первые оценки важности учета дисперсии в задачах сверхширокополосной импульсной радиолокации для конкретных природных сред.

3. Экспериментально показана возможность применения импульсной георадиолокации до глубин 100 и более метров, в том числе на основе сравнения результатов дистанционных методов электроразведки, сейсморазведки и импульсной георадиолокации на одних и тех же объектах, как в условиях полупустынных сухих грунтов, так и вечной мерзлоты.

4. Показано, что резкий передний фронт импульса обеспечивает повышение информативности георадиолокационных данных и улучшает их качество для исследования малоконтрастных объектов. Эта рекомендация по формированию зондирующего импульса получена на основе сопоставления

результатов моделирования и экспериментальных данных для различных природных и техногенных сред.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показана важность учета дисперсии анализируемых сред в задачах сверхширокополосной импульсной радиолокации как на основе моделирования, так и качественного сопоставления результатов моделирования с данными импульсных георадаров, включая эксперименты в соляных шахтах с очень низкой проводимостью, которые показали зависимость ослабления импульса от его длительности.

2. Выявлены особенности вклада проводимости в характеристики зондирующего сверхширокополосного импульса в средах с дисперсией и дано качественное подтверждение существования этих особенностей.

3. Показаны возможности импульсного подповерхностного радиозондирования до глубин 100 и более метров в различных гидрогеологических условиях на основе анализа экспериментальных данных, полученных разными методами.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность полученных результатов и сделанных выводов обоснована с помощью расчетов, сравнением с экспериментальными данными и с исследованиями других авторов. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями в российских и зарубежных журналах, их апробацией на российских и международных конференциях и отзывами российских и зарубежных компаний, активно применяющих аппаратуру и методику интерпретации данных в практической работе.

Практическая значимость работы

Полученные результаты диссертации использовались и могут быть использованы для решения широкого круга задач импульсной георадиолокации. Рекомендации по формированию зондирующего импульса для увеличения разрешающей способности и глубины зондирования могут способствовать созданию импульсных георадаров с улучшенными характеристиками.

В рамках проведенных экспериментов в различных геологических и гидрологических условиях получены данные георадиолокационного импульсного зондирования сред со средним и сильным поглощением с глубин в десятки и сотни метров, подтвержденные другими геофизическими методами и, в том числе, заверенные результатами бурения. Тем самым значительно расширена сфера практического применения метода георадиолокационного зондирования в шахтах и с земной поверхности. Аппаратура и методика интерпретации данных активно используется на многих объектах в России и за рубежом.

Апробация работы

Основные результаты, включенные в работу, докладывались лично и обсуждались на следующих общероссийских и международных конференциях: Генеральная ассамблея Европейского союза геофизических исследований 2013 (EGU General Assembly 2013), Вена, Австрия, 2013; X Международная научная конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании», посвященная 80-летию со дня рождения первого космонавта планеты Ю.А. Гагарина, Пицунда, Абхазия, 2014; Научная конференция «Освоение Арктики – новый виток в развитии отечественной науки и инноваций», Салехард, 2014г.; Всероссийская конференция с международным участием «Арктика – нефть и газ 2015», г. Москва, 2015; V Всероссийские Армандовские чтения, V Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Всероссийская научная конференция

«Практическая радиолокация», Муром, 2015; Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде (WRE2015), Пекин, Китай, 2015.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в числе которых 5 статей в реферируемых журналах (4 из списка, рекомендованного ВАК, 1 в зарубежном журнале), 1 монография, созданная в соавторстве, 9 работ в трудах конференций, 1 патент.

Личный вклад автора

Все результаты по теме диссертации получены лично автором или при его активном участии. Публикации по теме диссертации написаны в соавторстве. Автор проводила расчёты распространения импульса в модельных средах, принимала участие в экспедиционных работах, получении экспериментальных результатов и их интерпретации, формулировании выводов и обобщений.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 126 страниц. Диссертация содержит 58 рисунков и 1 таблицу.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** дан краткий обзор затронутых в диссертации проблем, сформулированы цели исследования и определена его задача, обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость. Там же представлен краткий обзор развития дистанционных методов зондирования как введение в круг решаемых задач.

Основные результаты работы, составляющие основное содержание диссертации, представлены в трёх главах.

В **главе 1** представлены теоретическая модель сверхширокополосного импульсного радиосигнала в диэлектрической среде с дисперсией, но без учета проводимости этой среды, и результаты качественного сопоставления этой

модели с экспериментальными данными. Описано развитие теории распространения электромагнитных волн для метода наносекундной моноимпульсной сверхширокополосной георадиолокации. Обсуждена математическая постановка задачи исследования распространения ограниченных по времени и неограниченных по спектру электромагнитных импульсных сигналов при соблюдении принципа причинности. Представлены решения системы уравнений, описывающей процесс распространения импульса, включая описание движения фронта сигнала, в зависимости от вида функции диэлектрической проницаемости.

Дана математическая постановка задачи с использованием уравнений Максвелла в одномерном приближении, при падении сигнала из вакуума на диэлектрик при отсутствии сторонних токов.

В области $x \geq 0, t \geq 0$ ищется решение системы интегро-дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2)$$

$$D(t, x) = E(t, x) + \int_0^{\infty} f(\tau, x) E(t - \tau, x) d\tau, \quad (3)$$

с начальными условиями

$$E(t, x) = H(t, x) = 0 \text{ при } t \leq 0, \quad (4)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial E}{\partial t} - c \frac{\partial E}{\partial x} = 2E'_0 \text{ при } x = 0, \quad (5)$$

и условием излучения при $x \rightarrow \infty$.

Функция диэлектрической проницаемости параметризована коэффициентами действительной функции $f(t)$. Предполагается, что падающая волна имеет разрыв производной на фронте.

Получены модели функции $f(t)$ для моделей электронной поляризации, дипольной (ориентационной) поляризации и дипольной поляризации с инерцией, часто встречающихся в природных и техногенных средах.

Приведено преобразование Лапласа исходной линейной системы уравнений, все функции которой обращаются в нуль до начала процесса и ограничены по величине во время развития процесса. Получено решение задачи (1-5). Получен явный вид функции $V(t,x)$, описывающей поведение сигнала в диэлектрике, когда форма сигнала в вакууме представляет собой ступенчатую функцию (функцию Хевисайда).

Анализируется функция $V(t,x)$ для рассмотренных моделей поляризации. Приведены результаты численного моделирования распространения электромагнитного сигнала в форме функции Хевисайда в однородном диэлектрике. Результаты расчетов представлены в виде графиков функции $V(t,x)$ и графиков распространения сигнала с разным периодом падающей волны для различных моделей $f(t)$.

В заключение главы, с позиций изложенной теории, проанализированы экспериментальные данные и по ним исследованы форма, поглощение и скорость распространения импульса в реальных средах.

В главе 2 представлена теоретическая модель взаимодействия сверхширокополосного импульсного сигнала с диэлектриком, имеющим проводимость. Учтена проводимость в функции диэлектрической проницаемости, определены параметры диэлектрической проницаемости, описывающие уменьшение затухания с уменьшением частоты зондирующего импульса. Проведены численные расчеты для сравнения квазистационарного приближения, в котором работает метод становления поля электроразведки с

точными решениями для выбранных параметров диэлектрической проницаемости.

Получено общее выражение для функции диэлектрической проницаемости на основе уравнения движения заряженной частицы в электрическом поле с учетом затухания из-за столкновений. Оно включает все частные случаи, рассмотренные в главе 1. При этом основное ограничение заключается в том, что учитывается только один тип заряженных частиц в формировании сигнала. Описаны частные случаи различных соотношений длительности сигнала и эффективной частоты соударений заряженных частиц.

Рассмотрена параметризация диэлектрической проницаемости для случая поляризации, учитывающей только проводимость, в том числе зависимость удельного затухания от частоты сигнала при разных значениях проводимости.

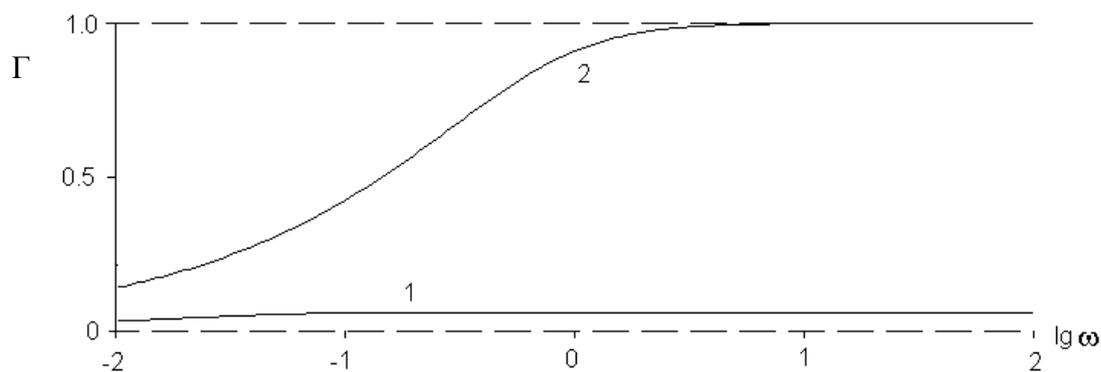


Рис.1. Зависимость удельного затухания от частоты ω при $\epsilon_0 = 4$, $\sigma = 0.25$ (1) и $\sigma = 4$ (2).

Проведены сравнение численных расчетов функции $V(t,x)$ с решением уравнения теплопроводности, справедливого в условиях квазистационарности

$\epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \ll \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$, для различных значений вещественной части диэлектрической проницаемости ϵ_0 и проводимости σ .

Показано, что до значений $\omega \cong \sigma / \epsilon_0$ высокие частоты затухают быстрее, чем низкие, а выше этой границы удельное затухание перестает зависеть от

частоты, стремясь к значению $\Gamma_{\infty} = \sigma / (2\sqrt{\varepsilon_0})$ (рис. 1). Таким образом, высокочастотные сигналы затухают по закону $\exp(-\Gamma_{\infty}x)$, почти не меняя своей формы. В области низких частот затухание зависит от частоты и при ее снижении может быть сколь угодно малым.

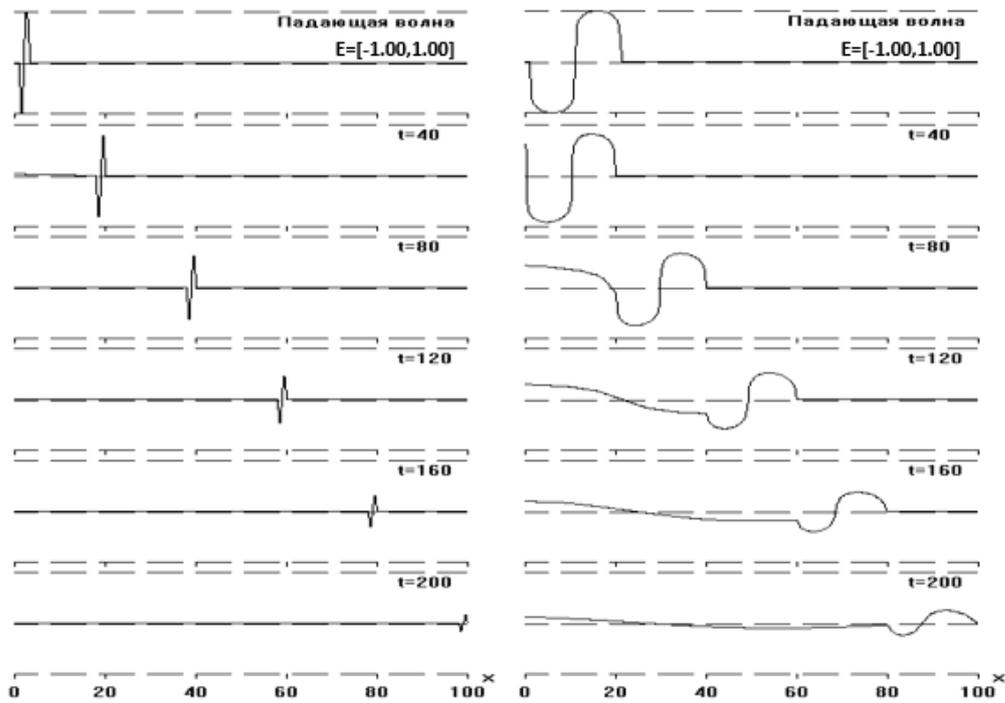


Рис.2. Распространение сигналов с периодами падающей волны $T=4$ (слева) и $T=40$ (справа) при $\varepsilon_0 = 4$, $\sigma = 0.25$. Логарифмическая шкала

Произведена параметризация диэлектрической проницаемости для поляризации, учитывающей проводимость и инерцию частиц, и показаны результаты численного моделирования зависимости затухания и формы сигнала от длительности импульса и проводимости. Например, представленные на рис. 2 результаты численного моделирования для диэлектрика с учетом проводимости служат иллюстрацией того, как сигнал, распространяющийся с затуханием, но без искажения формы при $\sigma T \leq 1$ переходит в типичную картину затухания в скин-слое проводника при $\sigma T \gg 1$.

Приведены примеры экспериментальных работ, полученные в средах с различной проводимостью, рассмотрена дисперсия сигналов в реальных средах, проанализировано изменение характеристик сигнала при распространении в среде, которая также претерпевает изменения в результате налагаемого на неё при зондировании внешнего электромагнитного поля.

В конце главы предложены рекомендации для увеличения глубины зондирования и разрешающей способности моноимпульсного георадиолокатора.

В главе 3 приведены конструктивные особенности моноимпульсных сверхширокополосных георадаров, и изложены полученные с их помощью результаты экспериментов. Дано сопоставление результатов георадарного зондирования с результатами зондирования другими геофизическими методами тех же объектов и описаны области эффективного применения георадарного зондирования.

Описаны георадиолокаторы «ГРОТ», использующие мощные импульсные сигналы наносекундной длительности и оцифровку принимаемого отраженного сигнала во всем диапазоне частот без частотного и временного преобразования в тракте приёма.

Приведены основные технические характеристики георадаров модельного ряда «ГРОТ 12», перекрывающих диапазон рабочих частот от 1 до 1500 МГц, с импульсной мощностью более 1МВт, диапазоном временных задержек до 32000 нс.

Полученные экспериментальные результаты и результаты теоретического моделирования задают направление совершенствования конструкции сверхширокополосных импульсных георадаров. Показана важность использования импульсов с большой крутизной переднего фронта, что положено в основу конструкции передатчика. Рассмотрены дополнительные

возможности конструкции георадаров, позволяющие, в процессе измерений увеличивать рабочую крутизну фронта.

Представлены результаты сравнения результатов георадарного зондирования с результатами сейсмоакустического зондирования и определена область эффективного использования георадарного зондирования.

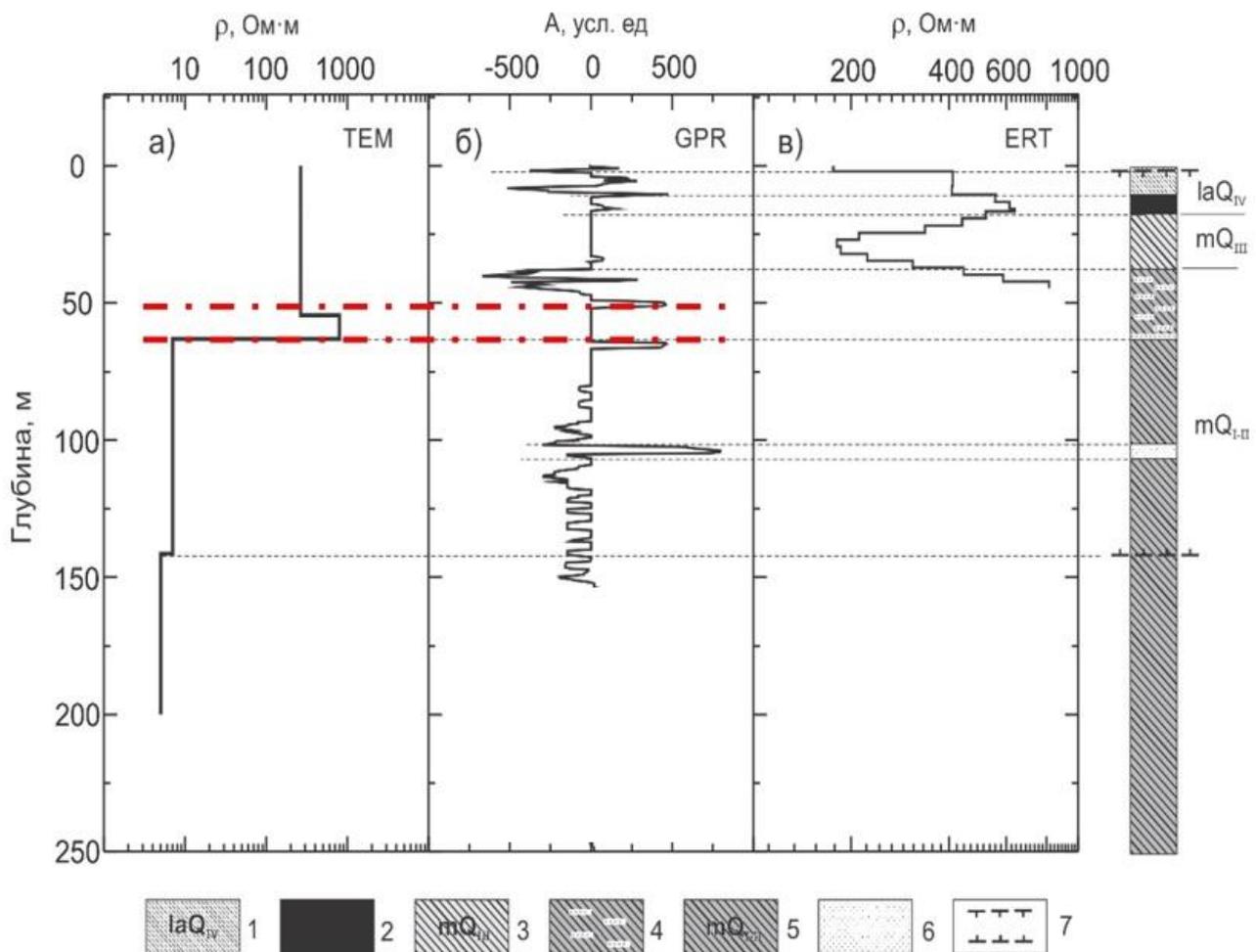


Рис.3. Геоэлектрические модели по данным методов становления поля (а) и электротомографии (в) и волновая форма сигнала георадиолокации (б) в одной и той же точке профиля съемки: 1- озерно-аллювиальные супеси; 2- лёд; 3- суглинки; 4- горизонт с прослоями газогидратов; 5- морские засоленные суглинки; 6- песок; 7- границы ММП

Представлены результаты комплексирования георадиолокации с методами электротомографии и становления поля при обследовании одного природного объекта (гигантской воронки на полуострове Ямал), где было установлено, что данные, полученные различными методами, показывают хорошее соответствие

(рис 3). При этом, метод георадиолокации позволил провести разделение слоёв разреза с различными электрофизическими параметрами до глубин 140-150 метров и выделить зоны тектонических нарушений, показав, существенно лучшую разрешающую способность на всех глубинах.

Описано применение метода георадиолокации на примере натуральных экспериментов по обнаружению и идентификации малоконтрастных неоднородностей, таких как трещины в массивах грунта.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы и выводы.

Основные результаты работы

1. Получены точные решения задачи распространения сверхширокополосного импульсного сигнала в однородном диэлектрике в одномерном приближении для трех распространенных в природе моделей диэлектрической проницаемости. Они представлены в виде интегралов от параметров среды и начальных характеристик сигнала, которые решались численно. Отличие этих решений от известных заключалось, во-первых, в учете более реалистичных видов диэлектрической проницаемости, для которых были известны только асимптотики, во-вторых, в использовании преобразований Лапласа, а не Фурье, чтобы учесть именно сверхширокополосный импульсный сигнал.

2. На основе этих решений и качественного сопоставления с экспериментальными данными представлены первые оценки важности учета дисперсии в задачах сверхширокополосной импульсной радиолокации для конкретных природных сред, включая качественное объяснение следующих экспериментальных эффектов:

- ослабление затухания сигнала при увеличении длительности импульса при проведении эксперимента в соляных шахтах с очень низкой проводимостью;

- появление низкочастотных составляющих спектра сигнала при распространении в средах с высокой проводимостью.

3. Экспериментально показана возможность применения сверхширокополосной импульсной георадиолокации до глубин 100 и более метров в том числе на основе сравнения результатов дистанционных методов электроразведки, сейсморазведки и импульсной георадиолокации на одних и тех же объектах, как в условиях полупустынных сухих грунтов, так и вечной мерзлоты.

4. Предложены рекомендации по формированию зондирующего импульса в целях повышения разрешающей способности и глубины, которые получены на основе сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных. Показано, что резкий передний фронт импульса обеспечивает повышение информативности георадиолокационных данных и улучшает их качество для исследования малоконтрастных объектов, а увеличение длительности импульса способствует увеличению глубины зондирования.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность всем соавторам и коллегам по ИЗМИРАН и других организаций, с которыми представилась возможность плодотворно работать, каждый из которых внес свой вклад в результаты представленной работы.

Автор выражает особенную благодарность Е.А. Руденчику, принявшему участие в этой работе.

Библиография

1. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М., Электродинамика сплошных сред, М., Наука, 1982, стр.389

2. Вайнштейн Л.А. Распространение импульсов // Успехи физ. наук, 1976, 118, вып. 2, с. 339–367

3. Бараш Ю.С., Гинзбург В.Л. О выражениях для плотности энергии и выделяющегося тепла в электродинамике диспергирующей и поглощающей среды. // Успехи физ. наук, 1976, 142, вып. 3, с. 523–531

4. Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора, СО РАН, Новосибирск, 2011, с. 115, ISBN: 978

5. Калинин А.В., Хмелевской В.К., Владов М.Л. и др. Современная георадиолокация // Разведка и охрана недр, 2001, № 3, с. 2–6

6. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. // М. Издательство ЛКИ, 2008, 656 с.

7. Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения/ Москва, РАН. Успехи физических наук, 2000, №5

8. Резников А.Е., Копейкин В.В., О Ен Ден, Большаков Е.Ю., Кюн С.Е., Волкомирская Л.Б., Щекотов А.Ю., Смирнов А.А. Сравнительные характеристики современных георадаров. – Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром: 2003, с. 441-445.

Публикации по теме диссертации:

1. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга. Экологические системы и приборы, 2012, №5, с. 1-3

2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Резников А.Е. Результаты георадиолокационных исследований заброшенных подземных выработок и оценка последствий их деградации на примере угольных шахт Южного Уэльса

(Австралия) и Ростовской области (Россия) //Экологические системы и приборы, 2012, №5, с. 6-15

3. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Musalev D.N. The potentialities of ground-penetrating radar in the engineering geology using the radars GROT-12 and GROT-12E Geophysical Research Abstracts Vol. 15, EGU2013-1669, 2013, EGU General Assembly 2013

4. Волкомирская Л., Гулевич О., Руденчик Е., Георадиолокация в средах с дисперсией. Зависимость амплитуды и формы импульса георадара от дисперсии среды, Из-во LAP (Lambert Academic Publishing) 2013. С. 81. ISBN 978-3-659-35367-3

5. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Лиманский А.В., Резников А.Е. Метод пространственной локализации очагов горения углепородных отвалов (терриконов). //Экологические системы и приборы, 2014, №11, с. 40-55.

6. Balabin R.V., Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Safieva R.Z., Semyonov S.N. Georadar Sensing from Terrestrial Surface and Shafts: Approaches to Evaluation of Rock Fracturing . // Physics of Wave Phenomena, 2015, Vol. 23, No. 2, pp. 143–153

7. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А. Исследование состояния водных ресурсов с помощью дистанционного метода сверхширокополосной георадиолокации. //Экологические системы и приборы, 2015, №6, с. 3-16

8. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Ермолаев А.И., Резников А.Е., Сафиева Р.З. Перспективы выделения углеводородов и газогидратов при георадиолокационном обследовании и сохранение окружающей среды. X Международная научная конференция «Информационные технологии в науке, технике и образовании», посвященная 80-летию со дня рождения первого космонавта планеты Ю.А. Гагарина, 22 сентября - 4 октября 2014г., Пицунда, Абхазия, <http://kubmntk.ru/news.html#news14>

9. Богоявленский В.И., Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Исследование воронки на полуострове Ямал 10 ноября 2014г георадарами ГРОТ 12 и ГРОТ 12н. Материалы конференции «Освоение Арктики – новый виток в развитии отечественной науки и инноваций», 3 – 6 декабря 2014г., город Салехард, ЯНАО. Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа, 2015, № 2(87)

10. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Резников А.Е., Сахтеров В.И., Шерстнев А.В. Предварительные результаты георадиолокационного обследования Ямальской воронки на глубину до 200 метров. 28 ноября 2014г., Институт геоэкологии РАН, Москва, PYRN RUSSIA MEETING 29

11. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Оленченко В.В., Резников А.Е. Комплексирование сверхширокополосной георадиолокации и электроразведки при изучении строения многолетнемерзлой толщи на примере Ямала. Всероссийская конференция с международным участием «Арктика – нефть и газ 2015», г. Москва, 2015

12. Бункин Ф.В., Белов А.И., Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кузнецов Г.Н., Ляхов Г.А., Резников А.Е. Комплексная технология сейсмоакустического и электромагнитного зондирования дна в мелководных районах для эффективного оконтуривания месторождений нефти и газоконденсата. Всероссийская конференция с международным участием «Арктика – нефть и газ 2015», г. Москва, 2015

13. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Сахтеров В.И. Новые возможности электромагнитного зондирования с контролируемым источником. V Всероссийские Армандовские чтения, V Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Всероссийская научная конференция «Практическая радиолокация», Муром, 2015

14. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Сахтеров В.И. Результаты обследования малококонтрастных газогидратных включений на полуострове Ямал георадаром ГРОТ 12Н. V Всероссийские Армандовские чтения, V Всероссийская научная конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике», Всероссийская научная конференция «Практическая радиолокация», Муром, 2015

15. Volkomirskaya L., Gulevich O. Location of groundwater and distant detection of water pollution with a use of GROT 12 superpowerful monopulse ground-penetrating radar. International Conference on Water Resource and Environment (WRE2015), Beijing, China, July 25-28, 2015

16. Гулевич О.А., Варенков В.В., Волкомирская Л.Б. Ляхов Г.А., Резников, А.Е., Руденчик Е.А., Сахтеров В.И. Способ и система георадиолокационного каротажа. Патент на изобретение № 2550773 по заявке №2014106905/28/(010958) от 25.02.2014г.

17. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А. «ГРОТ-12» раскрывает тайны земли. Исследование радаром гигантской воронки на полуострове Ямал. Информационно-аналитический журнал «Радиоэлектронные технологии», 2015, №3, с. 75-77