

На правах рукописи

Шашкова Татьяна Геннадьевна

**КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ КРУГОВОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ В ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ
ТРЕХМЕРНЫХ СРЕДАХ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Персова Марина Геннадьевна

Официальные оппоненты: Могилатов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, главный научный сотрудник

Куликов Виктор Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Защита состоится «19» июня 2014 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/static_files/29943/nstu_kand_dis_Shashkova.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Чубич Владимир Михайлович

Общая характеристика работы

Развитие математического аппарата моделирования трехмерных нестационарных электромагнитных полей во многом определяет уровень и возможности многих технологий электроразведки. Данная работа посвящена разработке программно-математического аппарата для источника в виде кругового электрического диполя (КЭД) – относительно нового и при этом многообещающего источника, возможности применения которого в настоящее время еще слабо изучены по причине отсутствия высокоточного и многофункционального программного обеспечения (ПО), позволяющего проектировать соответствующие полевые работы и интерпретировать получаемые в результате их выполнения данные. Особенно актуальным может быть использование источника КЭД для решения задач морской электроразведки.

Установка КЭД представляет собой радиально направленный ток, который заземлен в центре установки и на некотором расстоянии, называемым внешним радиусом КЭД. Технология, использующая КЭД в качестве источника, называется технологией зондирования вертикальными токами – она была предложена и разрабатывалась в работах В.С. Могилатова, Б.П. Балашова, А.В. Злобинского. Данная технология, в частности, позволяет при измерении вертикальной магнитной компоненты наблюдать на дневной поверхности только отклик от трехмерной неоднородности, свободный от откликов от вмещающей среды.

Для получения распределения электромагнитного поля в средах с относительно простой структурой часто используются аналитические и полуаналитические методы, разрабатываемые М.И.Эповым, В.С.Могилатовым, Е.Ю.Антоновым, S.Constable и др. Основное достоинство этих методов заключается в том, что базирующиеся на их использовании алгоритмы позволяют достаточно быстро, с небольшими вычислительными затратами получать характеристики изучаемого поля в отдельных точках (приемниках). А к главным недостаткам указанных методов можно отнести невозможность учета всех особенностей решаемой задачи, в том числе и полностью адекватного учета структуры среды. Методы численного моделирования являются с этой точки

зрения более универсальными, хотя и требуют более высоких вычислительных затрат. При решении дифференциально-краевых задач, описывающих геоэлектромагнитные поля в сложных средах, широко используются метод интегральных уравнений (МИУ), метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ). Соответствующие подходы разрабатывались и обсуждаются в работах L.H.Cox, V.Druskin, G.Egbert, E.Haber, R.Mackie, F.A.Maaø, G.A.Newman, D.W.Oldenburg, Y.Sasaki, W.Siripunvaraporn, G.A.Wilson, M.S. Zhdanov и др. Кроме того, при решении задач численными методами довольно часто используется технология выделения поля (Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, М.Е. Everett), которая позволяет многократно сократить вычислительные затраты при моделировании трехмерных геоэлектромагнитных полей.

При моделировании процессов становления поля КЭД необходимо также учитывать, что установившееся поле приводит к возникновению вторичного поля – поля вызванной поляризации (ВП). Вклад сигналов ВП для рассматриваемого источника может быть довольно существенным, а отсутствие учета этого вклада может привести к ошибкам в интерпретации данных. Кроме того, реальная моделируемая среда является трехмерной по своим геоэлектрическим свойствам. Поэтому использование упрощенных моделей (без учета анизотропности среды) для расчетов процессов становления поля и поля ВП для источника КЭД в анизотропных средах может также дать некорректный результат.

Таким образом, создание вычислительных схем и реализующего их ПО, позволяющего выполнять 3D-моделирование электромагнитных полей и полей вызванной поляризации для этой установки в сложных геоэлектрических средах с учетом наличия в них трехмерных неоднородностей с анизотропной проводимостью, является **актуальной** задачей, решение которой позволит расширить возможности электромагнитных технологий геологоразведки.

Основной научной проблемой, решению которой посвящена данная диссертационная работа, является проблема разработки и программной реализации вычислительных схем конечноэлементного моделирования

электромагнитных полей и полей вызванной поляризации для источника КЭД в изотропных и анизотропных средах. При этом разработанное программное обеспечение должно адекватно учитывать анизотропные свойства среды, геометрию источника и обладать высокой вычислительной эффективностью.

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка программно-математического аппарата 3D-моделирования геоэлектромагнитных полей, порождаемых источником в виде кругового электрического диполя. Для достижения этой цели были решены следующие задачи.

1. Разработаны вычислительные схемы 3D-моделирования стационарных и нестационарных геоэлектромагнитных полей, возбуждаемых источником в виде КЭД в анизотропных средах.

2. Разработаны вычислительные схемы 3D-моделирования полей вызванной поляризации, возбуждаемых источником в виде КЭД в изотропных и анизотропных средах.

3. Проведены исследования возможностей технологии электромагнитных зондирований с источником в виде КЭД при решении задач морской электроразведки.

Научная новизна

1. Разработан и реализован метод конечноэлементного моделирования процессов становления поля КЭД в анизотропных трехмерных средах.

2. Разработан и реализован метод конечноэлементного моделирования полей ВП в изотропных и анизотропных средах для источника в виде КЭД.

3. Проведено моделирование электромагнитных технологий с источником в виде КЭД для задач морской электроразведки в условиях арктического бассейна.

На защиту выносятся

1. Конечноэлементные схемы моделирования процессов становления поля КЭД в анизотропных трехмерных средах.

2. Конечноэлементные схемы моделирования полей ВП для источника КЭД в изотропных и анизотропных средах.

3. Программная реализация разработанных схем и результаты ее использования для решения задач геоэлектромагнетизма для источника КЭД.

Достоверность результатов

1. Расчеты полей для источника КЭД в простых средах сравнивались с результатами, полученными другими авторами.

2. Результаты моделирования полей ВП для источника КЭД сравнивались с результатами моделирования для установки, составленной из n горизонтальных электрических линий.

3. Верификация разработанных вычислительных схем моделирования процессов становления электромагнитных полей и полей ВП для источника КЭД в анизотропных средах проводилась на модели среды, содержащей трехмерный "пластинчатый" объект, в котором чередуются пластинки с различной проводимостью.

Практическая значимость работы и реализация результатов

Предлагаемые в данной работе методы построения трехмерных дискретизаций и конечноэлементные вычислительные схемы моделирования полей ВП реализованы в программном комплексе CED-MAR – 3D-моделирование геоэлектромагнитных полей кругового электрического диполя для решения задач морской электроразведки. Этот программный комплекс использовался для моделирования различных геоэлектромагнитных полей при проектировании полевых электроразведочных работ и формировании синтетических данных для анализа возможностей выполнения 3D-инверсий.

Личный вклад

Лично автором разработаны и программно реализованы методы моделирования процессов становления электромагнитных полей КЭД в анизотропных трехмерных средах, а также полей вызванной поляризации для источника КЭД в изотропных и анизотропных средах. Проведен анализ точности

получаемых конечноэлементных решений и вычислительной эффективности разработанных методов.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2010, 2011 гг.); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроники и приборостроения» (Новосибирск, 2012 г.); Российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, 2011 г.); Российской научно-технической конференции «Обработка информационных сигналов и математическое моделирование» (Новосибирск, 2013 г.); VI Всероссийской школе-семинаре по электромагнитным зондированиям Земли Имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2013), проведенной 2-6 сентября 2013 года, г. Новосибирск, Академгородок; Международном симпозиуме International symposium on Three-Dimensional Electromagnetics (Sapporo, Japan, May 7 – 9, 2013).

Работа выполнялась в рамках государственных заданий высшим учебным заведениям в части проведения НИР (шифр заявки 8.874.2011).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 11 работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК, 1 работа в сборнике научных трудов, 6 публикаций в сборниках трудов конференций и одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в ФИПС (Роспатент).

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников (105 наименований). Общий объем диссертации – 120 страниц, в том числе 49 рисунков и 12 таблиц.

Основное содержание работы

Первая глава диссертационной работы посвящена конечноэлементным схемам моделирования нестационарных электромагнитных полей и полей вызванной поляризации для источника КЭД в изотропных и анизотропных средах.

Двумерное нестационарное электромагнитное поле КЭД может быть полностью описано решением следующей начально-краевой задачи:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \vec{H} + \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \text{ в } \Omega^{2D}, \quad \vec{H} = (0, H_\varphi, 0), \quad (1)$$

$$H_\varphi|_{\Gamma_1} = H_\varphi|_{\Gamma_2} = H_\varphi|_{\Gamma_3} = H_\varphi|_{\Gamma_4} = 0, \quad (2)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля; σ – удельная электрическая проводимость среды; t – время; μ – коэффициент магнитной проницаемости; Γ_1 – вертикальная граница, которая определяется некоторым малым радиусом r_0 (внутренний радиус КЭД), Γ_2 – дневная поверхность; Γ_3 – удаленная вертикальная граница; Γ_4 – горизонтальная граница, являющаяся либо удаленной, либо границей между средой и фундаментом.

При этом для получения начального распределения \vec{H} (соответствующего моменту выключения тока в КЭД) необходимо решить стационарную краевую задачу:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \vec{H} = 0 \text{ в } \Omega^{2D}, \quad \vec{H} = (0, H_\varphi, 0),$$

$$H_\varphi|_{\Gamma_1'} = \frac{1}{2\pi r}, \quad H_\varphi|_{\Gamma_1/\Gamma_1'} = H_\varphi|_{\Gamma_2} = H_\varphi|_{\Gamma_3} = H_\varphi|_{\Gamma_4} = 0,$$

где граница Γ_1' заключена между точками $(r_0, 0)$ и $(R, 0)$, а R – внешний радиус КЭД.

Перейдем к рассмотрению трехмерного стационарного поля КЭД. Представим вектор-потенциал \vec{A} искомого поля в виде суммы $\vec{A} = \vec{A}^n + \vec{A}^a$, где

\vec{A}^n – вектор-потенциал поля вмещающей среды, а \vec{A}^a – вектор-потенциал поля влияния трехмерных объектов. Аналогично представим $\vec{E} = \vec{E}^n + \vec{E}^a$, $V = V^n + V^a$. В осесимметричной среде электрическое поле \vec{E}^n полностью описывается потенциалом V^n . Краевая задача для поля V^n выглядит следующим образом:

$$-div(\sigma^n grad V^n) = f, \quad (3)$$

$$V^n|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial V^n}{\partial n}|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4} = 0, \quad (4)$$

где σ^n – удельная электрическая проводимость вмещающей среды, а источник f представляет собой сумму двух сосредоточенных источников, расположенных в местах заземления электродов КЭД, причем по оси r один из источников расположен в начале координат, а другой (с обратным знаком) имеет координату R , равную радиусу КЭД.

Уравнение, описывающее распределение аномальной составляющей V^a скалярного электрического потенциала V в анизотропной среде, имеет вид:

$$-div(\sigma grad V^a) = -div((\sigma^n \mathbf{I} - \sigma) grad V^n), \quad (5)$$

$$V^a|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial V^a}{\partial n}|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4} = 0, \quad (6)$$

где $\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$, \mathbf{I} – единичная матрица (размера 3x3).

Для получения распределения стационарного трехмерного магнитного поля при условии, что магнитная проницаемость в Земле μ равна магнитной проницаемости вакуума μ_0 , необходимо решить следующую краевую задачу:

$$-\frac{1}{\mu_0} \Delta \vec{A}^a = -\sigma grad V^a - (\sigma - \sigma^n \mathbf{I}) grad V^n, \quad \vec{A}^a|_{\Gamma_A} = 0, \quad (7)$$

где Γ_A – граница трехмерной области определения магнитного поля.

Математическая модель, описывающая нестационарное электромагнитное поле КЭД, имеет вид:

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A}^a + \sigma \frac{\partial \vec{A}^a}{\partial t} = (\sigma - \sigma^n \mathbf{1}) \vec{E}^n, \quad \vec{A}^a \Big|_{\Gamma_A} = 0. \quad (8)$$

Начальным условием для нестационарного процесса с источником в виде КЭД является распределение поля $\vec{A}^a \Big|_{t=0}$, которое может быть найдено из решения задач (3) – (4), (5) – (6) и (7). Нормальное же поле \vec{E}^n может быть найдено после решения начально-краевой задачи (1) – (2) при использовании следующих соотношений:

$$E_r = -\frac{1}{\sigma^n} \frac{\partial H_\varphi}{\partial z}, \quad E_z = \frac{1}{\sigma^n r} \frac{\partial (r H_\varphi)}{\partial r}.$$

Перейдем к рассмотрению поля ВП. Установившееся (поляризующее) электрическое поле КЭД описывается краевой задачей

$$-\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V^0) = f^0 \quad (9)$$

с однородными краевыми условиями первого и второго рода, заданными на внешних границах области Ω определения потенциала V^0 поляризующего поля. Внешние границы этой области являются либо ее удаленными границами, либо плоскостями симметрии потенциала V^0 , либо границами раздела сред типа земля-воздух или земля-фундамент.

Задача ВП решается в среде, содержащей K поляризующихся горизонтальных слоев или трехмерных объектов Ω_k , $k = \overline{1, K}$, причем пересекаться Ω_k друг с другом могут только по своим границам. При этом каждый слой или объект Ω_k характеризуется коэффициентом поляризуемости $\alpha_k = \operatorname{const}$ и параметром спада $\beta_k = \beta_k(t)$.

Поле электрического потенциала $V^{ВП}$, описывающее процесс ВП в среде Ω с учетом поляризуемости всех ее слоев и трехмерных тел, может быть представлено в виде

$$V^{BII} = \sum_k \alpha_k \beta_k(t) W_k^{BII}, \quad (10)$$

причем поля W_k^{BII} могут быть получены как решения следующих краевых задач для уравнений

$$-div(\sigma grad W_k^{BII}) = -div(\delta_k \sigma grad V^0), \quad (11)$$

где δ_k – индикатор подобласти Ω_k :

$$\delta_k(x, y, z) = \begin{cases} 0, & (x, y, z) \in \Omega \setminus \Omega_k, \\ 1, & (x, y, z) \in \Omega_k. \end{cases} \quad (12)$$

Краевые условия в задаче (11) для потенциала W_k^{BII} являются однородными и совпадают с краевыми условиями для потенциала V^0 поляризующего поля.

Поле V^0 может быть представлено в виде суммы

$$V^0 = V^n + V^a, \quad (13)$$

в которой поле V^n вычисляется по формулам (3) – (4), а поле V^a может быть получено в результате решения краевой задачи (5) – (6).

Рассмотрим возможность применения технологии выделения поля к решению краевых задач для дифференциального уравнения вида (11) с учетом трех наиболее типичных ситуаций:

1) подобласть Ω_k является однородным по поляризуемости трехмерным объектом;

2) подобласть Ω_k является полным однородным по поляризуемости горизонтальным слоем, не содержащем в себе ни одного трехмерного тела или его части;

3) подобласть Ω_k является частью однородного по поляризуемости горизонтального слоя, из которого исключены входящие в него трехмерные тела или их части.

В ситуации, когда Ω_k является однородным по поляризуемости трехмерным объектом, правая часть уравнения (11) определяет поверхностный

источник, действующий на границах объекта Ω_k , не совпадающих с внешними границами расчетной области Ω . В этой ситуации решение краевой задачи для уравнения (11) не содержит в себе двумерной (осесимметричной) части, и поэтому решать эту задачу можно только как трехмерную.

Поле W_k^{BII} для случая однородного по поляризуемости слоя Ω_k может быть представлено в виде суммы двух полей:

$$W_k^{BII} = W_k^n + W_k^a, \quad (14)$$

где функция W_k^n является решениями краевой задачи для дифференциального уравнения:

$$-div(\sigma^n grad W_k^n) = -div(\delta_k \sigma^n grad V^n). \quad (15)$$

При этом функция W_k^n может быть получена из решения осесимметричной краевой задачи для определенного в цилиндрической системе координат $\{r, z\}$ уравнения

$$-div(\sigma^n grad W_k^{r,z}) = -div(\delta_k \sigma^n grad V^{r,z})$$

путем пересчета этого решения $W_k^{r,z}$ в декартову систему координат $\{x, y, z\}$.

Функция W_k^a может быть найдена из решения трехмерной краевой задачи для уравнения:

$$-div(\sigma grad W_k^a) = -div((\sigma^n \mathbf{I} - \sigma) grad W_k^n) - div(\delta_k \sigma grad V^a).$$

И, наконец, рассмотрим третью ситуацию, когда Ω_k является частью однородного по поляризуемости горизонтального слоя, из которого исключены входящие в него трехмерные тела или их части. Будем искать поле W_k^{BII} в виде суммы (14), в которой поля W_k^n определяются как решения краевых задач для дифференциальных уравнений:

$$-div(\sigma^n grad W_k^n) = -div(\tilde{\delta}_k \sigma^n grad V^n). \quad (16)$$

Функция $\tilde{\delta}_k$ является индикатором однородного по проводимости и поляризуемости слоя, внутри которого находится трехмерная область Ω_k с исключенными из нее трехмерными подобластями. Поэтому краевые задачи для уравнений (16) полностью аналогичны краевым задачам для дифференциальных уравнений (15) и их решения также вычисляются пересчетом решения $W_k^{r,z}$ осесимметричной задачи для уравнения

$$-div(\sigma^n grad W_k^{r,z}) = -div(\tilde{\delta}_k \sigma^n grad V^{r,z})$$

из цилиндрической $\{r, z\}$ в декартову $\{x, y, z\}$ систему координат. Тогда трехмерная составляющая W_k^a поля W_k^{BII} может быть получена как решение трехмерной краевой задачи для дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} -div(\sigma grad W_k^a) &= -div((\sigma^n \mathbf{I} - \sigma) grad W_k^n) + \\ &+ div(\hat{\delta}_k \sigma^n \mathbf{I} grad V^n) - div(\delta_k \sigma grad V^a) \end{aligned}$$

где $\hat{\delta}_k$ — индикатор трехмерных объектов, исключенных из однородного по проводимости и поляризуемости слоя.

Во **второй главе** диссертационной работы рассматриваются вариационные постановки и дискретные аналоги математических моделей, приведенных в первой главе диссертационной работы. Постановки приводятся с использованием как для узлового, так и для векторного МКЭ в изотропных и анизотропных средах.

В **третьей главе** диссертационной работы представлено описание разработанного программного комплекса. Приводится назначение программных модулей, разработанных автором, а также их взаимосвязь. Общая архитектура программного комплекса приведена на рисунке 1.

Основные модули обозначены прямоугольниками со сплошными линиями, структуры данных, которые либо заполняются в результате выполнения модулей, либо из которых берутся данные при выполнении модулей, обозначены прямоугольниками с пунктирными линиями. Линиями без направления обозначены связи между модулями. Линии с направлениями указывают или на

структуру, которая заполняется модулем, или на модуль, в который передается структура. Модули, в которых может быть учитывается возможная анизотропность среды, обозначены штрих-пунктиром.

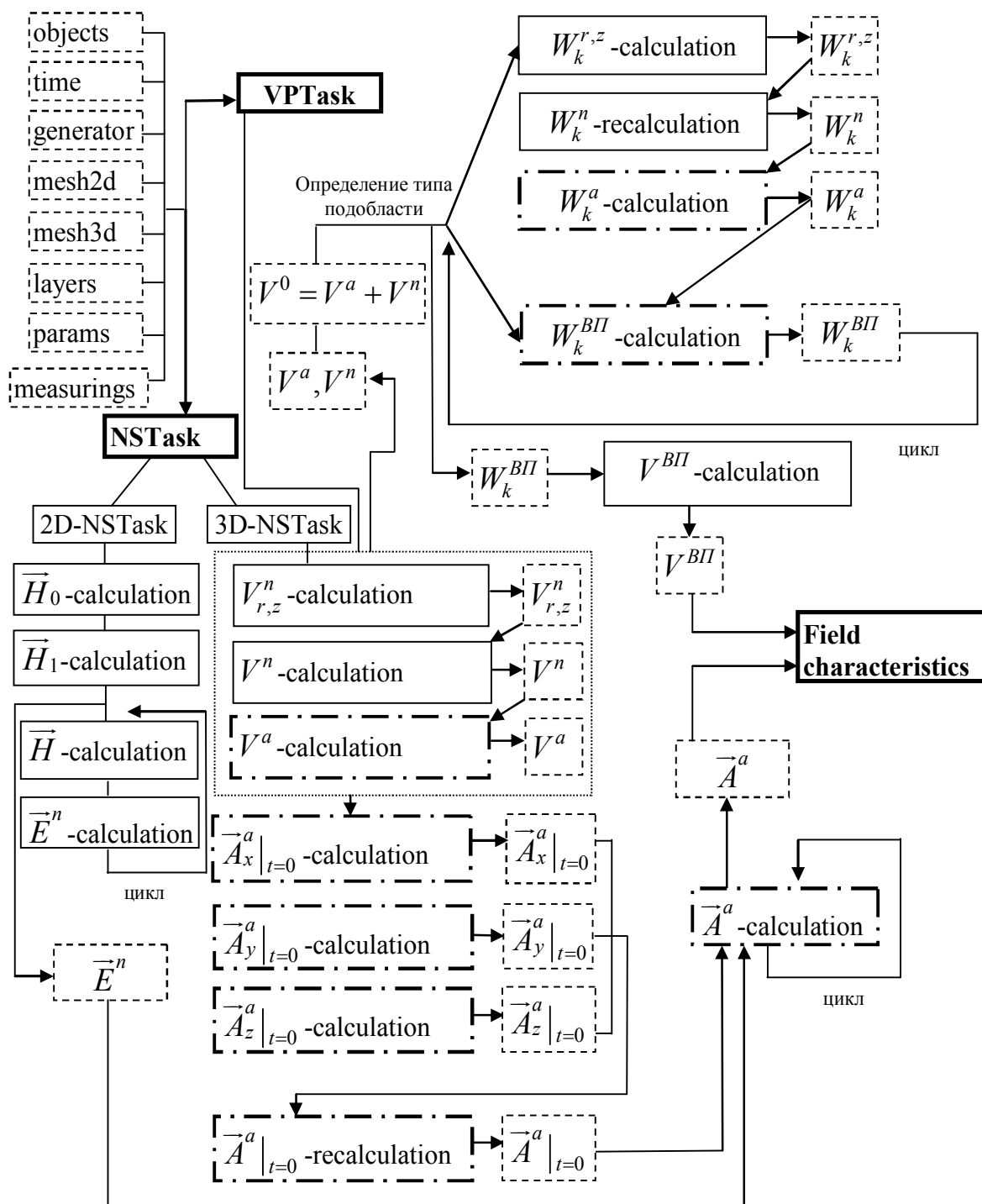


Рисунок 1 – Общая архитектура программного комплекса

Кроме того, в данной главе рассматривается верификация разработанных вычислительных схем.

Для анализа точности вычисления нестационарного электромагнитного поля КЭД в анизотропных средах рассмотрим следующую геоэлектрическую модель. В проводящее полупространство с удельной проводимостью 0.02 См/м на глубину от 100 м до 50 м помещен объект с размерами $300 \times 300 \times 50$ м³. Объект состоит из пластинок с чередующимися значениями удельной проводимости, которые соответственно равны $\sigma_1^{obj} = 5$ См/м и $\sigma_2^{obj} = 0.01$ См/м. Радиус источника составляет 100 м. План и разрез геоэлектрической модели с объектом, состоящим из 10 пластинок, представлены на рисунке 2.

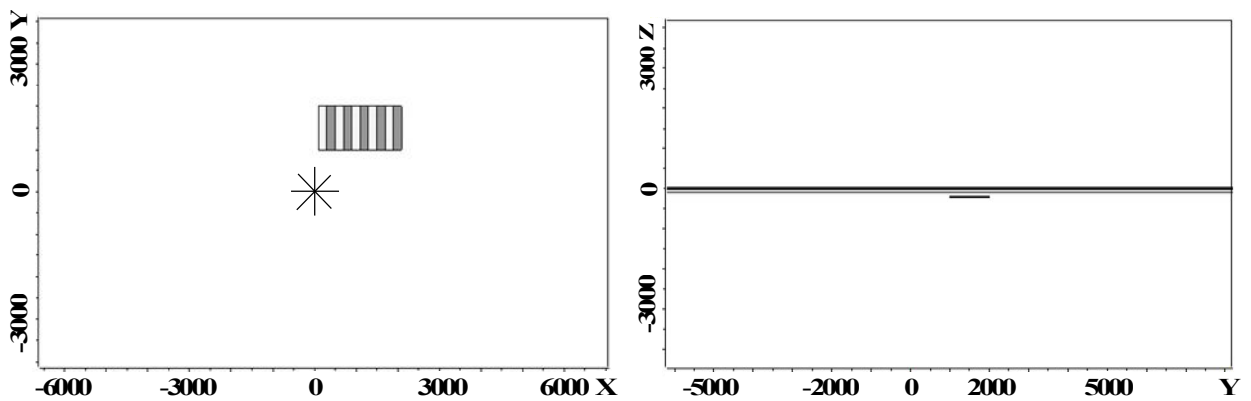


Рисунок 2 – План и разрез геоэлектрической модели

Сравним результаты моделирования нестационарного электромагнитного поля КЭД для трехмерной модели, содержащей такой "пластинчатый" объект, и для трехмерной модели, содержащей анизотропный объект, у которого коэффициенты проводимости рассчитываются следующим образом:

$$\sigma_x^{obj} = 2 \frac{\sigma_1^{obj} \cdot \sigma_2^{obj}}{\sigma_1^{obj} + \sigma_2^{obj}}, \quad \sigma_y^{obj} = \sigma_z^{obj} = \frac{\sigma_1^{obj} + \sigma_2^{obj}}{2},$$

и для заданных коэффициентов удельной электрической проводимости пластинок $\sigma_1^{obj} = 5$ См/м и $\sigma_2^{obj} = 0.01$ См/м тензор удельной электрической проводимости анизотропного объекта имеет вид:

$$\sigma^{obj} = \begin{bmatrix} \sigma_x^{obj} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^{obj} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.01996 & 0 & 0 \\ 0 & 2.505 & 0 \\ 0 & 0 & 2.505 \end{bmatrix}.$$

Для модели "пластинчатого" объекта были проведены расчеты для различного количества пластинок. На рисунке 3 представлено распределение поля ЭДС в момент времени 1.5 мс для "пластинчатой" и анизотропной задачи для ситуации, когда "пластинчатый" объект состоял из 40 пластинок. Также на рисунке 3 представлено распределение поля ЭДС для задачи с изотропным объектом, коэффициент удельной электрической проводимости которого равен 5 См/м. Все расчеты были проведены на одной и той же сетке.

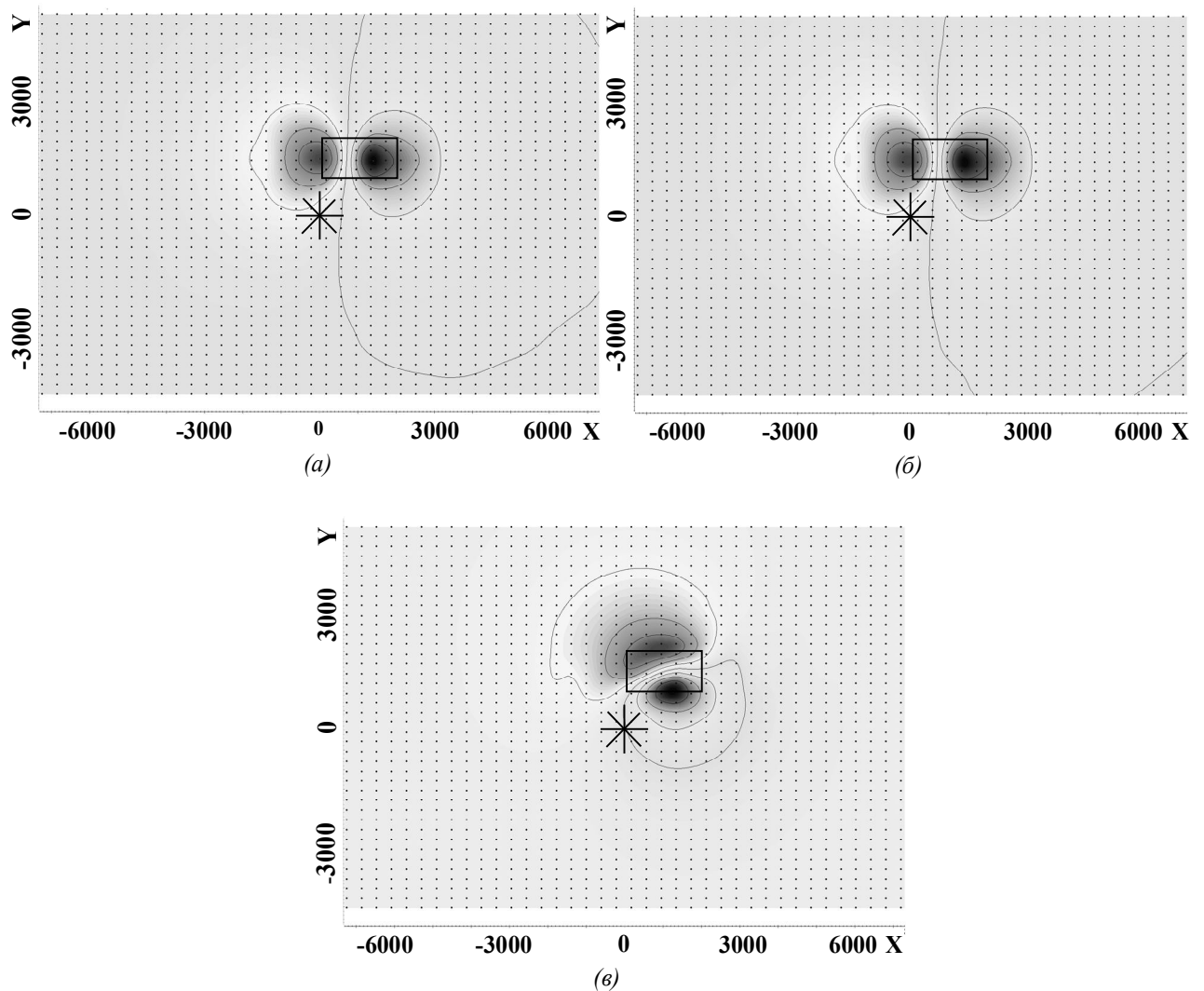


Рисунок 3 – Распределение поля ЭДС в момент времени 1.5 мс для "пластинчатой" (а) и анизотропной задачи (б)

Из приведенных результатов видно, что результаты расчетов для обоих подходов достаточно хорошо совпадают, что свидетельствует о корректности разработанных вычислительных схем и программных реализаций для расчета нестационарных электромагнитных полей в анизотропных трехмерных средах. Заметим, что при расчете поля для геоэлектрической модели как анизотропной вычислительные затраты существенно ниже за счет возможности использования более грубых пространственных дискретизаций.

Аналогично была проведена верификация расчета поля ВП в анизотропных средах.

Кроме того, анализ точности вычисления поля ВП в изотропных средах выполнялся следующим образом. Сравнивалось поле ВП, полученное для идеальной установки КЭД, и поле, рассчитанное как сумма полей от радиально расположенных горизонтальных линий (ГЭЛ). Результаты расчетов показали, что поле ВП для идеального КЭД и установки, состоящей из 8 радиально направленных ГЭЛ, получается достаточно близким. При этом разница в решениях, полученных с использованием двух рассмотренных подходов, не превышала 3%. Заметим, что при расчете сигналов на приемных линиях, расположенных на больших удалениях от источника, погрешность расчета электромагнитного поля КЭД в виде суммы полей от радиальных ГЭЛ очень велика, а ее уменьшение требует колоссальных вычислительных затрат, в то время как погрешность расчета электромагнитного поля для идеального КЭД слабо зависит от разносов приемных линий.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена описанию результатов вычислительных экспериментов моделирования процессов становления электромагнитных полей и полей ВП для источника КЭД в изотропных и анизотропных средах.

В одном из примеров приведены результаты моделирования электромагнитного поля для установки в виде КЭД, расположенной на дрейфующей льдине, при решении задачи картирования геоэлектрического строения и поиска месторождений полезных ископаемых.

Наибольший интерес представляет оценка возможности определения с помощью рассматриваемой технологии наличия тонких локальных слабопроводящих объектов, в том числе с пониженным значением только вертикальной удельной проводимости, имитирующих нефтегазовые залежи. На рисунке 4 приведен план и разрез геоэлектрической модели, представляющей собой трехслойную горизонтально-слоистую среду с параметрами $h_1 = 3000$ м, $\sigma_1 = 3$ См/м (слой морской воды), $h_2 = 4000$ м, $\sigma_2 = 0.5$ См/м, $h_3 = \infty$, $\sigma_3 = 0.001$ См/м (h_i – толщина i -го слоя, σ_i – его удельная проводимость), содержащую объект с параметрами $8 \times 10 \times 0.1$ км³ на глубине 4 км от поверхности моря. Электромагнитное поле возбуждается источником с радиусом 5 км, а его измерения выполняются с помощью заземленных приемных линий, расположенных по радиальным профилям.

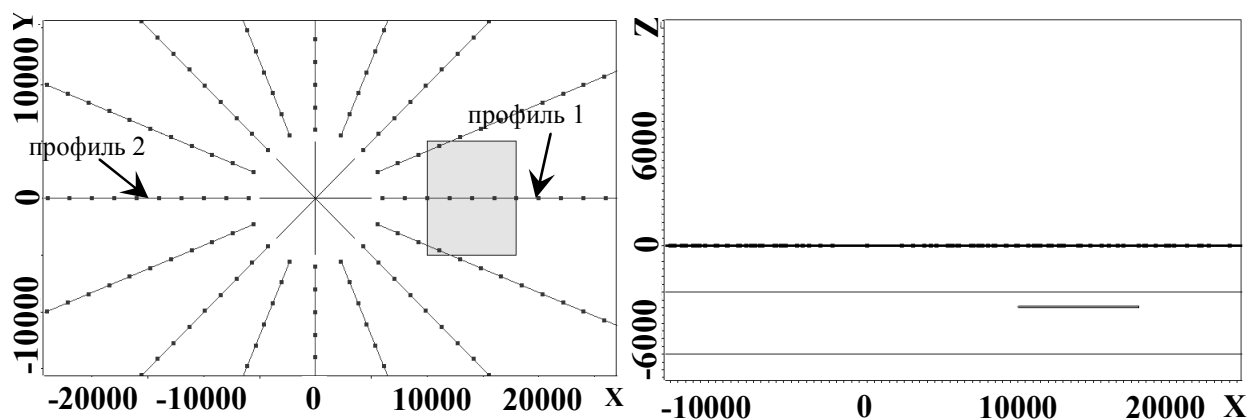


Рисунок 4 – План и разрез геоэлектрической модели слабопроводящего 3D-объекта, расположенного сбоку от источника и имитирующего нефтегазовую залежь в условиях арктического бассейна

При этом рассматривались три ситуации: изотропный объект с удельной проводимостью 0.01 См/м, анизотропный объект, у которого латеральная проводимость совпадает с проводимостью вмещающей среды, а вертикальная проводимость равна 0.01 См/м, и анизотропный объект с вертикальной проводимостью 0.001 См/м. Результаты расчетов для изотропной и двух анизотропных моделей в виде графиков сигналов в зависимости от разноса на

приемных линиях по двум радиальным профилям (обозначенным на рисунке 3), нормированных на поле горизонтально-слоистой среды, приведены на рисунке 5а. Из приведенных результатов расчетов видно, что в рассматриваемой технологии при боковом (по отношению к источнику) расположении объекта при работе на постоянном токе и в области ранних времен на сигнал влияет только вертикальное сопротивление объекта.

Заметим также, что анизотропные объекты с отличным от вмещающей среды только вертикальным сопротивлением практически не имеют аномалии в режиме становления поля. Соответствующие результаты приведены на рисунке 5б.

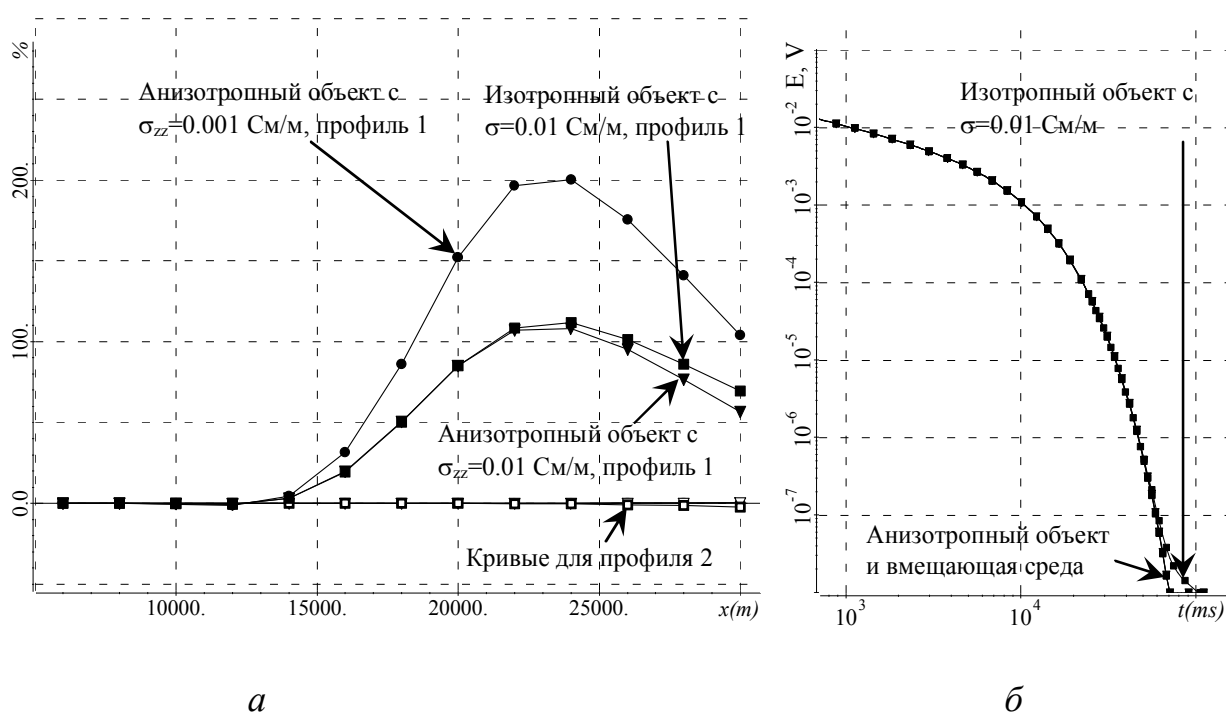


Рисунок 5 – Графики нормированных сигналов на приемных линиях по двум радиальным профилям в зависимости от разноса в момент времени 1 с (а), и графики зависимости сигналов от времени на приемной линии с разносом 8 км (б), рассчитанные для изотропной и анизотропных трехмерных моделей, показанных на рисунке 4

Рассмотрим теперь ситуацию, когда объект (толщиной 0.2 км) расположен на глубине 5 км от поверхности моря и часть его проекции попадает под источник. Результаты расчетов для изотропной и анизотропной (с значением

вертикальной проводимости 0.01 См/м) моделей в виде графиков сигналов в зависимости от разноса на приемных линиях по радиальному профилю (обозначенному на рисунке 6), нормированных на поле горизонтально-слоистой среды, приведены на рисунке 7.

Из приведенных на рисунке 6 результатов видно, что для разносов порядка 16 км сигналы для изотропной и анизотропной моделей совпадают, а для больших разносов начинают очень существенно отличаться.

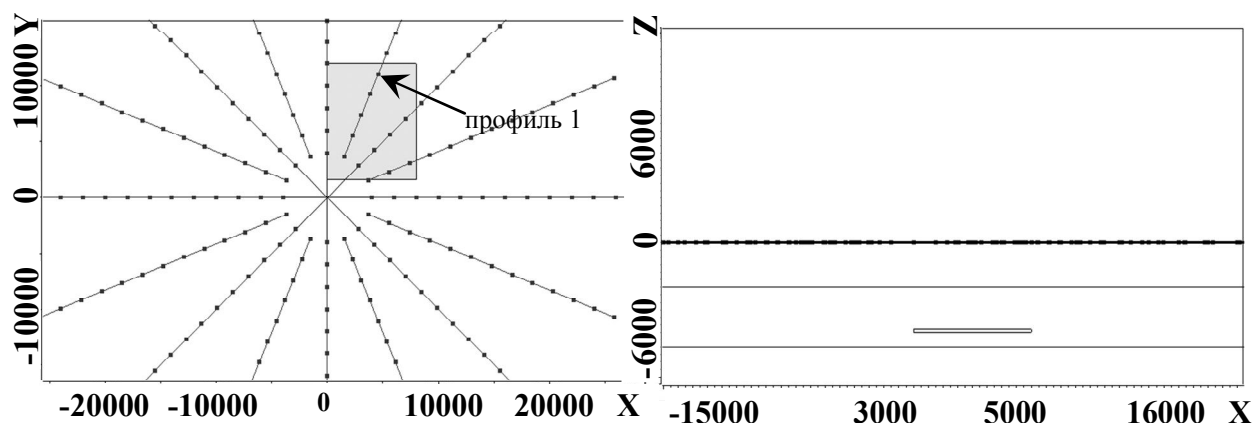


Рисунок 6 – План и разрез геоэлектрической модели слабопроводящего 3D-объекта, часть проекции которого попадает под источник и имитирующего нефтегазовую залежь в условиях арктического бассейна

В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что локальные 3D-объекты, у которых существенно пониженной является только вертикальная удельная проводимость, дают существенный вклад в измеряемый сигнал и могут быть достаточно уверенно определены при использовании для геоэлектромагнитного картирования рассматриваемой технологии с источником в виде КЭД. При этом отклики от изотропных и анизотропных объектов существенно различаются в области поздних времен (в нестационарном режиме) и на больших разносах при измерении сигналов на постоянном токе и в области ранних времен.

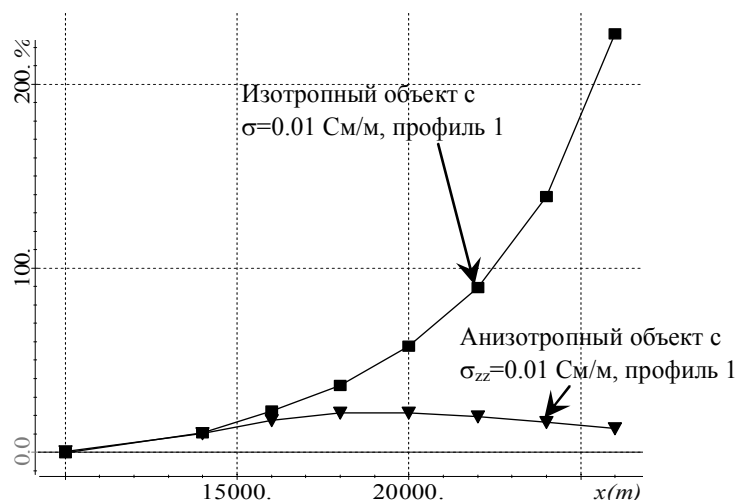


Рисунок 7 – Графики нормированных сигналов на приемных линиях по пересекающему объект радиальному профилю в зависимости от разноса, рассчитанных в момент времени 1 с для изотропной и анизотропной трехмерных моделей, показанных на рисунке 6

Оба этих фактора создают очень хорошие предпосылки использования данной технологии для обнаружения нефтегазовых объектов, особенно в глубоководной части арктического бассейна. Заметим, что в таких условиях стандартные электроразведочные технологии с горизонтальной электрической линией или магнитотеллурические зондирования не только не позволяют разделять объекты с изотропной и анизотропной проводимостью, но и в принципе определять их наличие на тех же глубинах в изучаемой среде.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты проведенных в диссертационной работе вычислительных экспериментов состоят в следующем.

1. Разработаны методы и вычислительные схемы конечноэлементного моделирования трехмерных стационарных и нестационарных геоэлектромагнитных полей, возбуждаемых источником в виде КЭД в анизотропных средах. Проведена верификация вычислительных схем путем сравнения решений, полученных для анизотропных и "пластинчатых" (представляющих собой множество изотропных объектов) моделей.

2. Разработаны методы и вычислительные схемы 3D-моделирования полей вызванной поляризации, возбуждаемых источником КЭД в изотропных и

анизотропных средах. Проведена верификация разработанных вычислительных схем на "пластинчатой" и анизотропной модели, а также проведено сравнение результатов расчета для идеального КЭД с результатами расчетов, полученных в виде суммы полей от ГЭЛ. Результаты верификации не только подтвердили правильность выполненных программных реализаций, но и показали вычислительные преимущества разработанных методов моделирования.

3. Разработанные вычислительные схемы реализованы в программном комплексе CED-MAR, который позволяет выполнять 3D-моделирование геоэлектромагнитных полей кругового электрического диполя в задачах морской электроразведки и при этом дает возможность учитывать анизотропию среды по параметру удельной проводимости и влияние процессов вызванной поляризации.

4. Показано, что при моделировании полей вызванной поляризации для источника в виде КЭД в анизотропных трехмерных средах учитывать нужно только анизотропию проводимости. Вместо учета анизотропии коэффициента начальной поляризации нужно учитывать объем поляризующейся среды.

5. Разработанный программный комплекс применялся для решения задач морской электроразведки в условиях арктического бассейна. Показаны возможности и преимущества технологии, использующей в качестве источника КЭД для поиска нефтегазовых залежей в глубоководной части арктического бассейна.

Основные публикации автора по теме диссертации

Журналы из Перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:

1. Персова, М.Г. Применение векторного МКЭ для моделирования процессов становления поля и поля вызванной поляризации от кругового электрического диполя в трехмерных средах / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Токарева, Ю.В. Тракимус, Т.Г. Шашкова // Доклады АН ВШ РФ, Новосибирск. – 2012. – №1(18). – С.123-133.

2. Персова, М.Г. Учет и оценка влияния рельефа дна при решении задач морской электроразведки на основе конечноэлементного 3D-моделирования / М.Г. Персова, Д.В. Вагин, М.Г. Токарева, **Т.Г. Шашкова** // Доклады АН ВШ РФ, Новосибирск. – 2012. – №1(19). – С.106-111.

3. Персова, М.Г. Решение трехмерных задач магнитотеллурики в сложных средах с использованием метода конечных элементов / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, П.А. Домников, **Т.Г. Шашкова**, М.В. Абрамов, Ю.И. Кошкина // Научный вестник НГТУ, Новосибирск. – 2013. – №1(50). – С.78-83.

Сборник научных трудов:

4. **Шашкова, Т.Г.** Моделирование процессов становления поля кругового электрического диполя в анизотропных средах / **Т.Г. Шашкова** // Сборник научных трудов НГТУ, Новосибирск. – 2013. – №1(71) . – С.59-64.

Материалы конференций:

5. Персова, М.Г. Сравнение вычисления полей вызванной поляризации для идеальной установки круговой электрический диполь и восьми лучевой установки, составленной из ГЭЛ / М.Г. Персова, **Т.Г. Шашкова** // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2012), Новосибирск: НГТУ. – 2010. – Т.6 . – С.94-96.

6. Персова, М.Г. О сравнении двух подходов к 3D-инверсии данных электромагнитных зондирований во временной области [Электронный ресурс] / М.Г.Персова, Ю.Г.Соловейчик, Д.В.Вагин, Е.И.Симон, **Т.Г.Шашкова** // Материалы VI Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2013). – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Режим доступа: <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>.

7. **Шашкова, Т.Г.** О подходе к повышению точности расчета процессов становления поля при решении трехмерных задач электроразведки / **Т.Г. Шашкова** // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской студенческой конференции молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Часть 1 – С. 109-111.

8. **Шашкова Т.Г.** Конечноэлементное моделирование полей вызванной поляризации для кругового электрического диполя / **Т.Г. Шашкова** // Информатика и проблемы телекоммуникаций. Российская научно-техническая конференция. Материалы конференции. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. Т. 1 – С. 126-129.

9. **Шашкова, Т.Г.** Конечноэлементное моделирование электромагнитных полей для кругового электрического диполя в анизотропных средах / **Т.Г. Шашкова** // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской студенческой конференции молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. Часть 1 – С. 209-211.

10. **Шашкова, Т.Г.** Моделирование полей вызванной поляризации для кругового электрического диполя в анизотропных средах / **Т.Г. Шашкова** // Обработка информационных сигналов и математическое моделирование. Российская научно-техническая конференция. Материалы конференции. Новосибирск. – 2013. – С. 110-113.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

11. Соловейчик, Ю.Г. CED-MAR – 3D-моделирование геоэлектромагнитных полей кругового электрического диполя для решения задач морской электроразведки / Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, М.В. Абрамов, Д.В. Вагин, П.А. Домников, **Т.Г. Шашкова** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012618432 от 17.09.2012. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2012.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16 объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.
Заказ подписано в печать 2014 г.