

На правах рукописи

МАРИНЕНКО АРКАДИЙ ВАДИМОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
В ГРАДИЕНТНЫХ СРЕДАХ**

25.00.10 — геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2009



Работа выполнена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

- Научный руководитель:** д.т.н., профессор Э.П. Шурина
- Официальные оппоненты:** д.ф.-м.н., профессор Ю.М. Лаевский,
д.г.-м.н., профессор Н.О. Кожевников
- Ведущая организация:** Институт геофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург

Защита состоится 16 июля 2009 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3
Факс: 8 (383) 333-25-13

С текстом диссертационной работы можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ИНГТ СО РАН (проспект Академика Коптюга, 3)

Автореферат разослан 10 июня 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геол.-мин. наук



Н.Н. Неведрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работа посвящена созданию вычислительного аппарата, который позволяет математически верно (с помощью функциональной зависимости) учесть коэффициент электропроводности таких сложных по своим физическим свойствам сред, как морская вода. Правильный учет коэффициента электропроводности среды в перспективе может привести к созданию новых методов поиска полезных ископаемых в придонных акваториях морей.

Рассматриваемая задача важна, прежде всего, для морской геофизической разведки, которая применяется для поиска и изучения месторождений полезных ископаемых в пределах континентального шельфа, а также материкового склона и ложа Мирового океана [Федынский В.В., 1967; Шапировский Н.И., 1962]. Первые работы по морской геофизической разведке были выполнены в 30-е годы XX века в СССР, США и Франции с применением электроразведки и гравиметрии; в 1941 году на Каспийском море впервые в СССР была произведена морская сейсморазведка. Морская геофизическая разведка проводится обычно совместно с батиметрическими измерениями, дающими представление о морфологии дна океана. Задачи морской геофизической разведки: изучение глубинного строения земной коры под водами морей и океанов; поиски и подготовка к разведочному бурению площадей, перспективных на нефть и газ; картирование подводных россыпных месторождений. Морская геофизическая разведка использует методы магнитометрии, гравиметрии, электроразведки, ядерной геофизики, сейсмической (также сейсмоакустической) разведки [Гайнанов А.Г., 1991; Кузнецов О.Л., 1986; Номоконов В.П., 1990; Хмелевский В.К., 1989]. Последний метод имеет важное значение для поисков структур, перспективных на нефть и газ. Большое значение для морской геофизической разведки имеет определение координат точек геофизических наблюдений, которое в открытом море осуществляется радиогеодезическим способом, по определению местоположения судна в радиоволновом поле береговых станций, а также с помощью искусственных спутников Земли. Для морской геофизической разведки используют экспедиционные суда, преимущественно малых и средних размеров, водоизмещением от 300 до 1500 тонн, которые оборудуются геофизической аппаратурой, эхолотом, радионавигационными средствами и наборными ЭВМ для экспрессной обработки поступающей информации. Морская геофизическая разведка выполняется обычно во время движения судна, что даже при малой скорости его движения дает высокую производительность и более низкую, чем на суше, стоимость работ.

Все большее истощение природных ресурсов, колебания цены на нефть и газ, конкуренция и даже войны за полезные ископаемые дали морской электроразведке второе дыхание. Данный факт объясняется тем, что по оценкам специалистов только на территории Северного Ледовитого океана

находится до 25 процентов мировых запасов нефти и природного газа [“Российская газета”, 2007 г.].

Цель работы. Разработка и реализация вычислительных схем на базе векторного метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования гармонических по времени электрических полей в трехмерных неоднородных областях, включая такие области, коэффициент электропроводности которых зависит от одной из пространственных координат.

Методы исследования. Методы вычислительной математики, функциональный анализ, линейная алгебра, численные методы.

Защищаемые научные результаты:

- Разработан и программно реализован алгоритм моделирования трехмерных электромагнитных полей в средах с функциональной зависимостью электропроводности от глубины.
- Получены вычислительные схемы для эффективных расчетов зарядов в составных областях, фрагменты которых могут иметь коэффициент электропроводности, зависящий от одной из координат.
- Показано, что в прибрежных акваториях морей могут быть рассмотрены варианты поиска нефтегазовых месторождений с использованием более эффективных методов, чем морская электроразведка с фокусировкой тока (МЭРФТ/CSEM).

Научная новизна:

- Сформулированы вариационные постановки в форме Галеркина, позволяющие выполнить закон сохранения заряда, ориентированные на векторный метод конечных элементов, для моделирования гармонических по времени электрических полей в трехмерных составных областях, фрагменты которых могут иметь коэффициент электропроводности, зависящий от одной из пространственных координат (например, глубина слоя морской воды).
- Построены дискретные аналоги вариационных постановок в форме Галеркина с использованием векторного метода конечных элементов, разработаны и программно реализованы алгоритмы моделирования гармонических по времени электрических полей в трехмерных составных областях, фрагменты которых могут иметь коэффициент электропроводности, зависящий от одной из пространственных координат.
- Разработаны специальные вычислительные схемы, учитывающие функциональную зависимость коэффициента электропроводности от координаты z (глубины) и отличающиеся от схем с усредненными коэффициентами электропроводности.

Теоретическая и практическая значимость работы. В работе представлен новый подход к моделированию векторных гармонических по времени электрических полей в геометрически сложных трехмерных областях с

функциональной зависимостью коэффициента электропроводности от одной из пространственных координат. На базе векторного метода конечных элементов реализован не имеющий аналогов программный комплекс, который может применяться для решения задач морской геоэлектрики в геометрически и физически сложных областях. Предложенные в диссертационной работе подходы могут служить основой алгоритмов решения практических задач электромагнетизма в различных физических приложениях и прежде всего при поиске нефтегазовых месторождений в прибрежных акваториях морей.

Личный вклад. Все результаты, изложенные в диссертации без ссылок на работы других авторов, принадлежат лично автору.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены и докладывались на:

- Всероссийская молодежная научная конференция «Трофимуковские чтения 2006» (Новосибирск, 2006).
- Всероссийская молодежная научная конференция «Трофимуковские чтения 2007» (Новосибирск, 2007).
- Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, 2007).
- Всероссийская молодежная научная конференция «Трофимуковские чтения 2008» (Новосибирск, 2008).
- VII Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные Недра Кузбасса. IT-технологии» (Кемерово, 2008).
- IX Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Кемерово, 2008).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 9 работ, в том числе в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК, — 1 («Геология и геофизика», 2009, №5)

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы (100 наименований). Работа изложена на 104 страницах, включая 50 иллюстраций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обоснована значимость и актуальность темы работы, сформулированы цели, методы и основные результаты исследования, представлена научная новизна работы. Кратко описаны структура и основное содержание диссертации.

Глава 1. В главе 1 представлен обзор современных подходов к моделированию задач морской геоэлектрики, а также геометрические и физические свойства подводного рельефа, нефтяных скоплений и самой воды.

В п. 1.1 проведен анализ существующих методов решения задач поиска нефтегазовых месторождений в прибрежных акваториях морей. Широкое

развитие морской электроразведки сопровождается постепенным расширением модельной базы за счет введения в модель структурных элементов и неоднородностей сложного строения. При этом практически всегда считается, что слой морской воды характеризуется постоянной электропроводностью. В то же время известно, что для прибрежных районов морей характерны изменения электропроводности по вертикали [Unesco, 1981]. Они обусловлены изменениями температуры и солености воды на разных глубинах. В каждой конкретной прибрежной зоне эта зависимость разная, но, как правило, носит линейный характер. В настоящее время все методы морской геоэлектрики основаны на том, что источники и приемники электромагнитного поля должны располагаться вблизи дна, как можно ближе к объектам поиска и разведки [Ellingsrud et al., 2002; Carazzone et al., 2005; Choo et al., 2006]. Высокая сложность аппаратуры и технологии проведения таких работ очевидна. Кроме того, при сложном морском рельефе точное определение местоположения источников и приемников не представляется возможным. Нескольким разновидностям подобных методов — морским CSEM (Controlled-Source Electromagnetic Methods), посвящен специальный раздел из примерно ста страниц одного из выпусков журнала *Geophysics*. Как следует из [Constable S., 2007], морские CSEM методы начали изучаться в научном сообществе в ранних 1980-х. Тем не менее, их применение для поиска полезных ископаемых началось совсем недавно. Начиная с 2000 года, интенсивность научных и промышленных исследований в этой области значительно возросли, а методы обработки и интерпретации данных развиваются медленнее. Эта ситуация изменилась после того, как научные институты, нефтяные и газовые компании объединили свои усилия в разработке метода CSEM и в возможности применения его для измерений электрической проводимости. Значительно проще и дешевле, чем в морских CSEM методах, располагать питающие и приемные электроды на поверхности воды. Однако численные результаты, полученные на моделях со слоем морской воды с постоянной электропроводностью, показывают слабую эффективность такого подхода. С другой стороны, есть достаточное количество данных по частотным электромагнитным зондированиям на шельфе, которые не могут быть воспроизведены в рамках общепринятых моделей. Так, в частности, было установлено, что геометрическое затухание монохроматического электрического поля на поверхности воды существенно отличается от того, что получается при моделировании в горизонтально-слоистой среде. Такие эффекты свидетельствуют о том, что не учитываются отклики, обусловленные частью вторичных электрических источников. Можно предположить, что несоответствие результатов в моделировании и измерениях определяются тем, что при расчетах не учитывается изменение электропроводности с глубиной, то есть из-за неоправданного упрощения модели задачи.

В п. 1.2 рассматриваются геометрические особенности акваторий морей и связанные с ними физические свойства. Донная аккумуляция, ведущая к

изменению рельефа дна за счет погребения коренных неровностей, является важнейшим интегрирующим геолого-геоморфологическим процессом на дне морей и океанов, обеспечивающим, в конечном счете, выравнивание рельефа дна Мирового океана [Рычагов Г.И., 2006]. Таким образом, в тех частях мирового океана, где осадкообразование происходит высокими темпами, учет коренных неровностей морского дна можно пренебречь, задавая его поверхность плоской и ровной. Однако необходимо внимательнейшим образом относиться к типу донных отложений, поскольку если электромагнитные характеристики коренного рельефа и донных отложений существенно различаются, то при моделировании следует задавать каждую из этих сред отдельно.

В п. 1.3 исследуются нефтеносные породы и скопления нефти различного типа. Рассмотрим сочетание природных условий, которые способны привести к скоплению нефти [Хант Дж., 1982]. Прежде всего, в районе должны иметься коллекторы — породы, способные впитывать, а потом и отдавать жидкости и газы. Все породы разделены на три большие группы: осадочные, магматические и метаморфические. Нефть имеет смысл искать, прежде всего, среди осадочных пород. Именно они обладают наилучшими коллекторскими свойствами. Коллекторы различают по пористости, то есть суммарному объему всех пор в данной породе, и по проницаемости — способности пропускать сквозь себя жидкость и газ. В природе бывают и трещиноватые коллекторы: порода сама по себе имеет мало пор — она достаточно плотна, но имеет множество трещин, которые связаны в единую сеть и могут создавать каналы протяженностью в десятки километров. Еще одно условие образования залежи — сверху она должна быть прикрыта флюидоупором, то есть слоем пород, непроницаемых для нефти и газа. Такими породами-покрышками обычно бывают глины, каменная соль или известняки, если они не пронизаны трещинами. Эти дополнительные слои пород необходимо учитывать при моделировании электрического поля в морской воде. Чаще всего залежи приурочены к антиклиналям. Под антиклинальной складкой скапливаются запасы нефти и газа. К антиклинальным ловушкам относится подавляющее большинство обнаруженных месторождений нефти и газа в мире — почти 90% в России и около 70% за рубежом [Геодекян А.А., 1985]. В данной работе, в реальных задачах будут рассматриваться месторождения с параболической формой, по своей структуре наиболее схожие с антиклинальными изгибами, поскольку именно данный тип месторождений является наиболее распространенным на Земле.

В п. 1.4 описаны градиентные зависимости электропроводности морской воды от глубины на примере данных Юнеско. Важным вопросом для математического моделирования задач морской геоэлектрики, наряду с геометрическими и физическими особенностями дна мирового океана и нефтяных месторождений, является вопрос состава, давления и температуры морской воды, а точнее всех тех ее свойств, которые влияют на значение

электропроводности. Экспериментальные исследования вод Мирового океана осуществляются с помощью различных средств и методов наблюдения [Смирнов Г.В., 2005]. Основным источником информации о процессах, протекающих в водной толще, являются прямые океанографические измерения. При проведении таких экспериментов широко используются зондирующие CTD (conductivity — электропроводность, temperature — температура, depth — давление) комплексы [Лазарюк А.Ю., 2006], регистрирующие одновременно несколько гидрологических характеристик, в том числе и важную для задач морской геоэлектрики электропроводность. Электропроводность морской воды связана с ее плотностью, поскольку обе эти величины зависят от температуры, солености и давления. Но так как вода практически несжимаема, то только первые два фактора имеют определяющее влияние на электропроводность и плотность морской воды. От особенностей распределения этих характеристик зависит структура горизонтальной и вертикальной циркуляции, перемешивание вод и ряд других гидрофизических процессов, протекающих в океане. На большей части Мирового океана относительные изменения температуры воды значительно превышают изменения солености [Канаев В.Ф., 1975]. Поэтому распределение электропроводности и плотности воды на поверхности и на глубинах океана определяется главным образом температурой. Но в некоторых районах, там, где формируются высокосолёные или, наоборот, распресненные воды, абсолютное влияние солености на электропроводность и плотность становится сравнимым с соответствующим влиянием температуры. Несмотря на то, что в каждой области Мирового океана такая зависимость по своему уникальна, можно построить некоторые обобщенные зависимости в соответствии с данными [Unesco, 1981] и представить их в виде функций, которые, с незначительной погрешностью, можно упростить до линейных (рис. 1). Подобные линейные функции используются в данной работе при моделировании задач морской геоэлектрики.

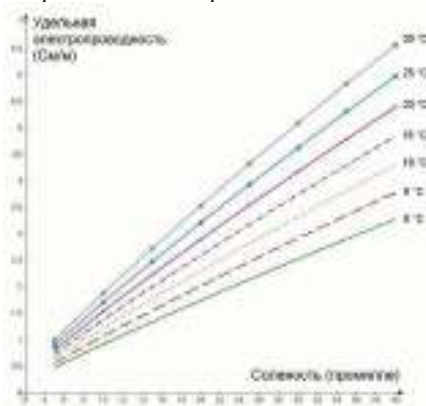


Рис. 1. Зависимость электропроводности морской воды в См/м

Глава 2. В главе 2 сформулированы векторные вариационные формулировки и их дискретные аналоги для моделирования гармонического по времени электромагнитного поля в неоднородных трехмерных областях, включая такие области, в которых коэффициент электропроводности зависит от одной из пространственных координат.

В п. 2.1 описывается математическая модель и класс решаемых в работе задач. Фундаментальной математической моделью, описывающей поведение электромагнитного поля, является система уравнений Максвелла с соответствующими начальными и краевыми условиями [Стрэттон, 1948; Jackson, 1962]. Поведение гармонического во времени электрического поля описывается векторным уравнением Гельмгольца $rot\mu^{-1}rot\vec{E} - k^2\vec{E} = i\omega\vec{j}^e$, где \vec{E} — напряженность электрического поля (В/м), μ — магнитная проницаемость среды (Гн/м), \vec{j}^e — плотность стороннего тока (A/m^2), $k^2 = i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon$ — волновое число, только реальная часть \vec{j}^e отлична от нуля. Выпишем закон сохранения свободного электрического заряда: $div((\sigma + i\omega\varepsilon)\vec{E}) = 0$. Рассмотрим задачу, в которой электропроводность есть функция глубины $\sigma = \sigma(z)$. Тогда закон сохранения электрического заряда примет вид: $\frac{\partial\sigma(z)}{\partial z}E_z + (\sigma(z) + i\omega\varepsilon)div\vec{E} = 0$.

Первое слагаемое здесь описывает дополнительный заряд, который может появиться за счет вертикального изменения электропроводности среды (необходимое условие его появления состоит в наличии ненулевой z -компоненты электрического поля).

В п. 2.2, для рассматриваемых математических моделей, формулируются векторные вариационные постановки. Пусть Ω — трехмерная, в общем случае неоднородная по физическим свойствам область с Липшиц-непрерывной границей $\partial\Omega$. Введем следующие гильбертовы пространства: $\mathbb{H}(\Omega) = \{\vec{v} \mid \vec{v} \in L_2(\Omega)\}$, где $L_2(\Omega)$ — пространство векторных комплекснозначных или действительных функций интегрируемых на множестве Ω с квадратом; $\mathbb{H}(rot; \Omega) = \{\vec{v} \mid \vec{v} \in \mathbb{H}(\Omega), rot\vec{v} \in \mathbb{H}(\Omega)\} \subset \mathbb{H}(\Omega)$, $\mathbb{H}_0(rot; \Omega) = \{\vec{v} \mid \vec{v} \in \mathbb{H}(rot; \Omega), \vec{n} \cdot \vec{v}|_{\partial\Omega} = 0\}$ с нормой $\|\vec{u}\|_{rot, \Omega}^2 = \int_{\Omega} \vec{u} \cdot \vec{u}^* d\Omega + \int_{\Omega} rot\vec{u} \cdot rot\vec{u}^* d\Omega$ и скалярным произведением $(\vec{u}, \vec{v}) = \int_{\Omega} \vec{u} \cdot \vec{v}^* d\Omega$. Запишем вариационную постановку в форме Галеркина для уравнения Гельмгольца: найти $\vec{E} \in \mathbb{H}_0(rot; \Omega)$ такое, что для $\forall \vec{V}^* \in \mathbb{H}_0(rot; \Omega)$ выполняется $(\mu^{-1}rot\vec{E}, rot\vec{V}^*) - (k^2\vec{E}, \vec{V}^*) = i(\omega\vec{j}^e, \vec{V}^*)$. Для пространства $\mathbb{H}_0(rot; \Omega)$ имеет место следующее свойство вложения $grad\phi \in \mathbb{H}_0(rot; \Omega)$, $\forall \phi \in \mathbb{H}_0^1(\Omega)$.

В п. 2.3 приводятся локальные векторные базисные функции на параллелепипедальных и тетраэдральных элементах. Для построения дискретных аналогов векторных вариационных постановок, необходимо ввести

конечномерные подпространства пространства $\mathbb{H}(rot;\Omega)$ и определить интерполяционные функции для аппроксимации \vec{E} . В качестве конечно-элементного подпространства $\mathbb{H}^h(rot;\Omega)$ пространства $\mathbb{H}(rot;\Omega)$ в данной работе использованы пространства векторных элементов Неделека [Nedelec J.C., 1980, 1986], конформных в $\mathbb{H}(rot;\Omega)$. Векторные конечные элементы, конформные в $\mathbb{H}(rot;\Omega)$, должны обеспечивать непрерывность тангенциальных компонент поля при переходе через границу элементов. Ограничения на непрерывность нормальных компонент не накладываются. Это свойство конечных элементов является определяющим при моделировании электрического поля \vec{E} .

В расчетной области можно построить параллелепипедальную или тетраэдральную сетки [Нечаев О.В., 2005; Fleischmann P., 1999], на ячейках которых определяются базисные edge-функции, ассоциированные с ребрами сетки конечномерного подпространства $\mathbb{H}^h(rot;\Omega) \subset \mathbb{H}(rot;\Omega)$. В данной работе для аппроксимации напряженности электрического поля \vec{E} использовались векторные конечные элементы Неделека первого порядка. При разбиении расчетной области на тетраэдральные геометрические элементы применялись элементы второго типа, а при разбиении на параллелепипедальные геометрические элементы — элементы первого типа.

В п. 2.4 приводятся дискретные вариационные постановки и соответствующие им системы линейных алгебраических уравнений. Для построения дискретного аналога вариационной задачи аппроксимируем элементы пространства $\mathbb{H}(rot;\Omega)$ элементами дискретного подпространства $\mathbb{H}^h(rot;\Omega)$. Тогда дискретный аналог вариационной задачи имеет

$$\text{вид: } \left(\frac{1}{\mu} rot \vec{E}_h^r, rot \vec{V}_h^{1*} \right)_\Omega - \left(\omega^2 \varepsilon \vec{E}_h^r, \vec{V}_h^{1*} \right)_\Omega + \left(\omega \sigma(z) \vec{E}_h^r, \vec{V}_h^{1*} \right)_\Omega = 0,$$

$$\left(\frac{1}{\mu} rot \vec{E}_h^i, rot \vec{V}_h^{2*} \right)_\Omega - \left(\omega^2 \varepsilon \vec{E}_h^i, \vec{V}_h^{2*} \right)_\Omega - \left(\omega \sigma(z) \vec{E}_h^i, \vec{V}_h^{2*} \right)_\Omega = \left(\omega \vec{J}^e, \vec{V}_h^{2*} \right)_\Omega. \quad \text{Для построенных}$$

дискретных подпространств имеет место свойство включения $\phi^h \in \mathbb{H}^h(grad;\Omega) \rightarrow grad \phi^h \in \mathbb{H}^h(rot;\Omega)$. Будем искать решение задачи в

подпространстве $\mathbb{H}_0^h(rot;\Omega)$ для реальной и мнимой частей $\vec{E} = \vec{E}^r + i\vec{E}^i$.

Представим эти величины в виде разложения по всем базисным функциям $\vec{N}_j \in \mathbb{H}_0^h(rot;\Omega)$: $\vec{E}^r = \sum_j \alpha_j \vec{N}_j$, $\vec{E}^i = \sum_j \beta_j \vec{N}_j$. Тогда решение вариационной задачи

будет эквивалентно решению системы уравнений относительно весов в

$$\text{полученном разложении } \begin{pmatrix} \hat{A} + \hat{M}_\varepsilon & \hat{M}_\sigma \\ -\hat{M}_\sigma & \hat{A} + \hat{M}_\varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{\alpha} \\ \vec{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{F} \end{pmatrix}. \quad \text{Элементы матриц } \hat{A}, \hat{M}_\varepsilon,$$

\hat{M}_σ и вектора правой части \vec{F} определяются соотношениями:

$$\left\{ \widehat{A} \right\}_{ij} = \frac{1}{\mu} \int_{\Omega} \text{rot} \vec{N}_j \text{rot} \vec{N}_i d\Omega, \quad \left\{ \widehat{M}_\varepsilon \right\}_{ij} = -\omega^2 \varepsilon \int_{\Omega} \vec{N}_j \vec{N}_i d\Omega, \quad \left\{ \widehat{M}_\sigma \right\}_{ij} = \omega \int_{\Omega} \sigma(z) \vec{N}_j \vec{N}_i d\Omega, \\ \left\{ \widehat{F} \right\}_i = \omega \int_{\Omega} \vec{N}_i \vec{j}^e d\Omega.$$

Глава 3. Глава 3 посвящена вычислительным экспериментам.

В п. 3.1 представлены результаты численного моделирования электрического поля в области с линейной зависимостью коэффициента электропроводности от координаты z . Также в этом пункте приводятся сравнения с результатами моделирования электрического поля в области с постоянной и кусочно-постоянной зависимостью коэффициента электропроводности. Для численной оценки влияния вертикальной неоднородности электропроводности выполнено моделирование гармонического электрического поля в среде, состоящей из трех областей с различной электропроводностью. Причем в среднем слое (морская вода) электропроводность зависит от глубины (рис. 2).

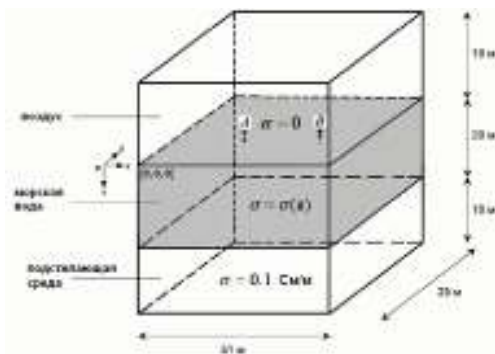


Рис. 2. Модель среды и расчетная область

На поверхности морской воды находятся два электрода — положительный (А) и отрицательный (В) (рис. 2), в которых задан ток силой 1 А, частота питающего тока равна 100 Гц. Расстояние между электродами — 25 м. Электропроводность у поверхности воды примем равной 5 См/м, а вблизи дна 7 См/м. Функциональная зависимость $\sigma(z)$ является линейной:

$$\sigma(z) = \sigma_0 \left(1 + \frac{z}{50} \right) \text{ См/м, где } \sigma_0 = 5 \text{ См/м. Будем сравнивать результаты численных}$$

расчетов электрического поля для двух моделей: с градиентным верхним слоем и с однородным (средняя электропроводность $\sigma = 6$ См/м). На векторной диаграмме поля \vec{E}^r (рис. 3), построенной в сечении $y = 12.5$ м, видно, что численные результаты для различного представления коэффициента электропроводности морской воды отличаются. Особенно ярко это отличие наблюдается в зоне $z \approx 20$ м (вблизи морского дна).

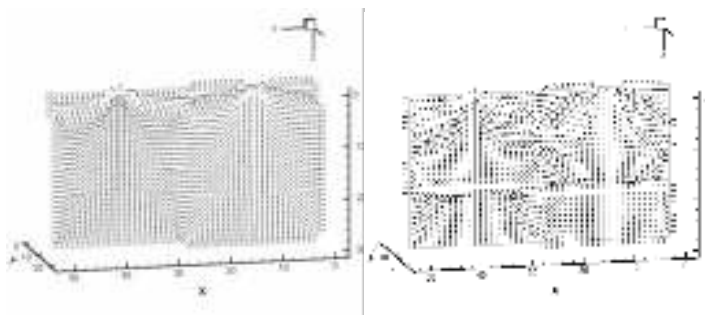


Рис. 3. Векторные диаграммы поля \vec{E}^r в сечении $y = 12.5$ м (линии векторов имеют равную длину).

Слева: осредненное значение σ . Справа: линейная зависимость $\sigma(z)$

Такое различие результатов может быть объяснено скопившимися в зоне $z \approx 20$ м (вблизи морского дна) электрическими зарядами, наличие которых не учитывается при осреднении коэффициента электропроводности морской воды.

В п. 3.2 рассмотрены результаты численного моделирования электрического поля для модели, содержащей неоднородность. Данный эксперимент отличается от предыдущего наличием объекта в виде куба со стороной 10 м, расположенного на глубине 50 м от поверхности воды и имеющего электропроводность $\sigma = 0.01$ См/м. Рассмотрим изменение значений электрического поля на поверхности воды (рис. 4) в случае наличия объекта в геологической среде.

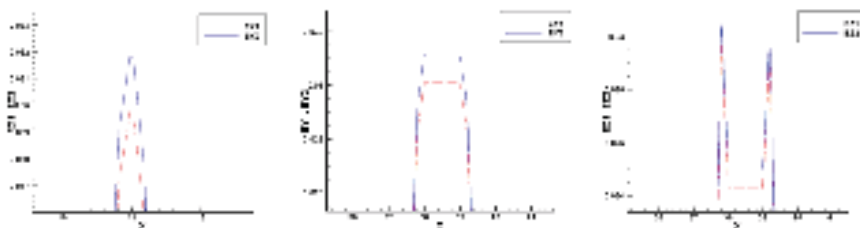


Рис. 4. Максимальные значения E_x^r , E_y^r , E_z^r по профилю Ox на поверхности ($y = 12.5$ м, $z = 0.2$ м). EX1, EY1, EZ1: без объекта. EX2, EY2, EZ2: с объектом

Как видно из результатов (рис. 4), наличие объекта в геологической среде отражается на значениях всех трех компонент электрического поля \vec{E}^r на поверхности воды (в случае наличия объекта значения компонент E_x^r , E_y^r и E_z^r на поверхности воды больше).

В п. 3.3 исследуется влияние типа источника на поведение электрического поля. Для этого рассматривалась задача полностью аналогичная предыдущей, за тем лишь исключением, что в качестве источника электрического поля выступали электроды, соединенные кабелем по которому течет ток и находящемся на высоте 1 м от поверхности воды. Таким образом, мы моделировали гальванический источник, где в качестве раствора электролита выступает морская вода. Результаты вычислений показали, что ни одна из компонент электрического поля не реагирует на наличие объекта в геологической среде. Невозможность обнаружения объекта с таким типом источника объясняется тем, что во всей области моделирования не наблюдались вторичные источники электрического поля. Из этого можно сделать вывод, что именно появляющиеся вблизи границы раздела сред заряды существенно помогают в обнаружении неоднородностей, так как они находятся ближе к объекту и их реакция на объект настолько значительна, что ощущается даже при измерениях, проводимых на поверхности воды.

В п. 3.4 показано влияние первичных источников электрического поля на локализацию зарядов вблизи морского дна. Взяв за основу первую из представленных в этой главе задачу (рис. 2), изменим ток в электродах и их количество. Пусть на поверхности морской воды находятся три электрода, размещенные в следующем порядке по оси X — один положительный (A) и два отрицательных (B_1 и B_2), в которых заданы токи силой 2 А, 1 А и 1 А, соответственно. Частоту тока будем задавать равной 100 Гц. Выбор именно такой комбинации из электродов объясняется желанием увеличить мощность одного из вторичных источников и уменьшить два других.

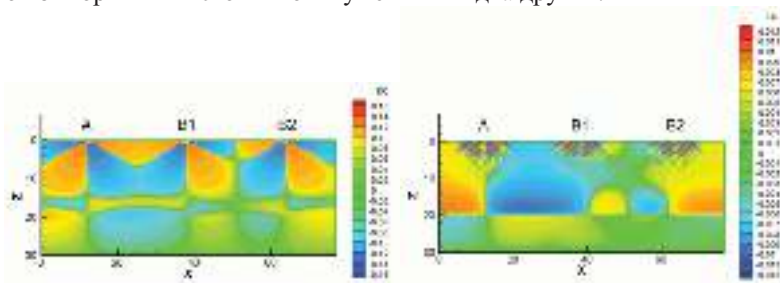


Рис. 5. Распределение компоненты поля E_x (сечение $y = 12.5$ м).

Слева: действительная компонента. Справа: мнимая компонента

Из рис. 5 следует, что электроды B_1 и B_2 частично компенсируют друг друга и тем самым вторичные источники, расположенные вблизи границы раздела сред по оси Z и между B_1 и B_2 по оси X, ослабевают, а вторичный источник, расположенный под электродом A, имеет большую мощность. Таким образом, в рассмотренной модели реакция на объекты, расположенные под электродом A будет более ярко выражена, чем реакция на объекты,

расположенные под электродами V_1 и V_2 . То есть существует возможность в той или иной степени регулировать мощность вторичных источников поля.

В п. 3.5 приведены подробные результаты численного моделирования электрического поля для задачи, которая максимально приближена к реальной ситуации. Пусть по поверхности морской воды движется корабль, к кормовой части которого прикреплен трос с двумя электродами — положительным и отрицательным (рис. 6), в которых задан ток силой 1 А. Расстояние между электродами 40 м.

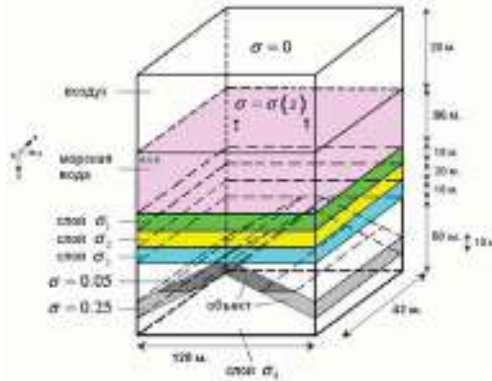


Рис. 6. Расчетная область для модели максимально приближенной к реальной

Донные осадки имеют различную природу и их значения электропроводности также различно: $\sigma_1 = 1/50$ См/м, $\sigma_2 = 1/1000$ См/м, $\sigma_3 = 1/3$ См/м. Подводный грунт имеет электропроводность равную $\sigma_4 = 1/10$ См/м. Для морской воды $\sigma(z) = \left(5 + \frac{z}{43}\right)$ См/м. В качестве объекта поиска выступает антиклинальная ловушка, поскольку именно данный тип месторождений нефти и газа наиболее распространен в мире. Чтобы найти полезные ископаемые необходимо задавать широкий диапазон частот, так как исследования могут проводиться на разных глубинах. При моделировании использовались частоты с диапазоном от 10 Гц до 70 Гц включительно с шагом 10 Гц. Зафиксируем положение электродов точно над антиклинальной ловушкой и поставим в данной точке начало отсчета по оси X. Придадим движение системе из двух электродов вправо (в сторону возрастания) по оси X, оставляя неизменными положения по осям Y и Z (корабль поплыл). Измерения будем проводить в точности между электродами с небольшим погружением в воду ($z = 1$ м). Чтобы выяснить, на какой частоте лучше проводить поиск полезных ископаемых для тех глубин, которые представлены в задаче, выведем разности между абсолютными значениями электрического поля для среды без объекта и среды содержащей объект при различных частотах (таблица 1).

Таблица 1

Влияние непроводящего объекта на компоненту электрического поля E_x^r на различных частотах

Частота (Гц)	10	20	30	40	50	60	70
Координата X точки с наибольшей реакцией на объект (м)	18	0	0	48	0	36	0
$\Delta E_x^r = E_{x,перв}^r - E_{x,возм}^r $, где $E_{x,перв}^r$, $E_{x,возм}^r$ — значения x-компонент поля в области без объекта и с объектом соответственно (В/м)	$3.03 \cdot 10^{-8}$ *	$4.43 \cdot 10^{-7}$ *	$7.03 \cdot 10^{-7}$ *	$1.08 \cdot 10^{-6}$ *	$2.5 \cdot 10^{-6}$ *	$2.55 \cdot 10^{-6}$ *	$8.29 \cdot 10^{-7}$ *

Как видно из таблицы 1, наибольшая реакция на объект наблюдается при частотах 50 Гц и 60 Гц, причем заметно, что чем ближе частота к 50–60 Гц, тем больше реакция на объект. Можно сделать вывод, что при поиске полезных ископаемых на тех же глубинах, что и в рассматриваемой модели, необходимо настраивать приборы на частоты в районе 50–60 Гц.

Глава 4. В главе 4 описаны возможности разработанного программного комплекса.

В п. 4.1 проводится сравнение разработанного программного комплекса с существующими конечно-элементными пакетами. Алгоритмы моделирования на базе векторного МКЭ, реализованные в программном комплексе состоят из нескольких программ, которые могут функционировать как вместе, так и независимо друг от друга. Такой подход был выбран исключительно в целях увеличения возможностей программного обеспечения. Весь комплекс программного обеспечения можно представить в виде схемы (рис. 7).

В п. 4.2 описаны заложенные в программах алгоритмы и приведено краткое руководство по эксплуатации программного комплекса.



Рис. 7. Общая схема разработанного программного обеспечения

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных в диссертационной работе исследований получены следующие результаты:

1. Исследованы и реализованы методы решения задач моделирования гармонических по времени электрических полей в средах с функциональной зависимостью электропроводности от глубины, которые могут быть расширены для учета функциональной зависимости других характеристик сред: диэлектрической и магнитной проницаемости.
2. Для векторного уравнения Гельмгольца, описывающего поведение гармонического по времени электрического поля, сформулирована векторная вариационная постановка, учитывающая наличие градиентного слоя морской воды. Показано, что электрическое поле, удовлетворяющее данной вариационной постановке, также удовлетворяет закону сохранения заряда в слабой форме. Построены дискретные вариационные аналоги на векторных конечных элементах первого порядка первого типа на параллелепипедальных сетках и первого порядка второго типа на тетраэдральных сетках. На тетраэдральных разбиениях используются иерархические базисные функции первого порядка второго типа.
3. Разработан платформонезависимый комплекс программ на языках Си и Фортран, включающий генератор и преобразователь сеток, генератор и решатели систем линейных алгебраических уравнений, позволяющие правильно учитывать коэффициент электропроводности, зависящий от глубины, и решать задачи морской геоэлектрики.
4. Были выполнены вычислительные эксперименты для морской воды с осредненным значением коэффициента электропроводности и при

линейной зависимости этого коэффициента от глубины. Численные эксперименты, использующие вычислительные схемы с $\sigma(z)$, позволяют учитывать объемные заряды, возникающие вблизи границы между градиентным слоем морской воды и подстилающей средой, мощностью и положением которых можно управлять за счет изменения первичных источников. Результаты моделирования могут быть использованы при интерпретации данных морской геоэлектрики.

5. Рассмотрены задачи поиска нефтегазовых месторождений в прибрежных акваториях морей с использованием менее затратных, чем CSEM методов, а порой и единственно возможных. Численное моделирование с применением разработанного алгоритма привело к глубокому пониманию физических особенностей поведения электромагнитного поля в градиентных средах, к которым относится морская вода. На основании проведенных в данной работе исследований могут быть предложены новые технологические схемы измерений в акваториях для поиска углеводородных месторождений.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментального оценивания порядка аппроксимации построенных вычислительных схем, сравнением с аналитическими решениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-05-64528), совместного международного проекта NWO-РФФИ (грант № 047.016.003), РФФИ (грант № 09-05-00702).

Автор выражает искреннюю признательность и глубокую благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Элле Петровне Шуриной, а также руководству Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука и лично д.т.н., академику РАН Эпову Михаилу Ивановичу за помощь и поддержку при работе над диссертацией.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Мариненко А.В., Эпов М.И., Шурина Э.П.* Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // Журнал «Геология и геофизика». Новосибирск, 2009, Том 50, № 5, С. 619-629.
2. *Мариненко А.В., Эпов М.И., Шурина Э.П.* Особенности моделирования электромагнитного поля в морской воде // Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Павлодар, 2006, Том 2, С. 32-42.
3. *Мариненко А.В.* Решение прямых задач морской геоэлектрики // Российская научно-практическая конференция «Информатика и

- проблемы телекоммуникаций». Материалы конференции. Новосибирск, 2007, Том 1, С. 157-160.
4. **Мариненко А.В.** Моделирование трехмерного электрического поля в задачах морской геофизики // Сборник научных трудов конференции «Инновационные Недра Кузбасса. IT-технологии-2008». — Кемерово, 2008.
 5. **Мариненко А.В.** Особенности моделирования электрического поля в морской воде // Труды 13-й международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии». — Томск: Изд-во «ТПУ», 2007.
 6. **Мариненко А.В.** Решение прямых задач морской геоэлектрики // Труды научной конференции «Трофимуковские чтения-2006». — Новосибирск, 2006.
 7. **Мариненко А.В.** Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // Тезисы докладов IX всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. — Кемерово, 2008.
 8. **Мариненко А.В.** Решение класса задач морской геоэлектрики векторным методом конечных элементов на различных базисах // Труды научной конференции «Трофимуковские чтения-2007». Новосибирск, 2007, С. 253-256.
 9. **Мариненко А.В.** Особенности моделирования электромагнитного поля в прибрежных акваториях морей // Труды научной конференции «Трофимуковские чтения-2008». — Новосибирск, 2008.

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано в печать 22.04.2009

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ. л. 0,9. Тираж 130. Зак. № 23

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, проспект Ак. Коптюга, 3