

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. С. ОРДЖОНИКИДЗЕ

На правах рукописи

ЮДИН МИХАИЛ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 550.837.6

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ
НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД**

Специальность 01.04.12 — геофизика

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук*

Москва — 1985

Работа выполнена в Московском ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочном институте имени Серго Орджоникидзе.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор М.С. Жданов (ИЗИРАН),
доктор физико-математических наук, профессор Е.В. Захаров (МГУ),
доктор технических наук Ф.М. Каменецкий (МГРИ).

Ведущая организация: Институт геофизики имени
С.И. Субботина АН УССР.

Защита диссертации состоится 27 декабря 1985 года в 15 часов на заседании специализированного совета Д.063.55.03 при Московском ордена Трудового Красного Знамени геологоразведочном институте имени Серго Орджоникидзе по адресу: 103912, Москва, центр, ГСП-3, проспект Маркса, 18, корпус В, аудитория № 254.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТИ.

Автореферат разослан «2» ноября 1985 года.

Ученый секретарь специализированного совета, доцент Г.В. Демура

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие вычислительных средств коренным образом изменило все стадии геофизических работ. Современная компьютеризированная многоканальная регистрирующая аппаратура предполагает переработку полученной геофизической информации на ЭВМ.

В этом процессе можно выделить два основных этапа:

1. Обработка результатов полевых измерений (демультиплексирование, фильтрация, выделение слабых сигналов на фоне помех (спектральный анализ, корреляция и т.п.),
2. Интерпретация материалов, полученных на первом этапе. Сюда относятся:
 - прямые методы интерпретации,
 - методы решения обратных задач посредством подбора модели геоэлектрического разреза на основе многократного решения прямых задач, зачастую использующие при этом средства интерактивной машинной графики и графические дисплеи.

Основой для интерпретации данных электроразведки служат решения прямых задач. В течение длительного времени она базировалась на расчетах применительно к одномерным горизонтально-слоистым моделям среды (А.Н. Тихонов, Л.Л. Ваньян, В.И. Дмитриев, М.Н. Бердичевский, Д.Н. Четаев, Д.Н. Шахсуваров, С.М. Шейнманн, Б.К. Матвеев, Б.Н. Страхов и др.). Класс более сложных электроразведочных задач, решаемых аналитическими методами, весьма ограничен и не может удовлетворить геофизиков - интерпретаторов. В последние два десятилетия все большее распространение получают методы численного решения прямых задач. Наибольшее развитие получили методы: интегральных уравнений (МИУ), конечных разностей (МКР), вариационно-разностные (ВРМ), гибридные, спектрально - итерационные и др.

МИУ всесторонне рассмотрен в работах отечественных (В.И. Дмитриев, Е.В. Захаров, Л.А. Табаровский, И.С. Барашков, И.В. Ильин, Г.А. Кокотушкин, Н.И. Мерщикова, Н.И. Несмеянова, Ш.Л. Таврткиладзе, А.Н. Тихонов и др.) и зарубежных (Райч, Вайдельт, Хоман, Тинг, Гвождара, Дас, Берма, Веннемейкер и др.) исследователей. Наиболее простыми и универсальными методами приближенного решения прямых задач электромагнитных зондирований (ЭМЗ) являются МКР (Прайс, Джонс, Паскоу, Вивер, Бревит-Тейлор, Мюллер, Лозеке, Лайнс, Возофф, Татралайи, И.С. Барашков, И.Л. Варданыц, И.М. Варенцов, Н.Г. Голубев, В.И. Дмитриев, М.С. Жданов, Е.В. Казанцева, В.В. Спичак, М.Н. Юдин) и ВРМ (Коггон, Ворд, Кисак, Петрик, Прайдмор, Роди, Сильвестер, Силл, Ранкин, Черв, В.В. Веселовский, И.В. Егоров, Е.В. Казанцева, М.Н. Юдин), МКР находит применение также при решении нестационарных задач (Л.А. Табаровский, А.Л. Румшицкая, Хоман др.). При использовании разностных методов нужно находить разумный компромисс между

стремлением по возможности ближе располагать границы области от изучаемой неоднородности и преодолением возникающие при этом трудностей в задании на них значений поля. Эта проблема решается либо путем построения асимптотических краевых условий (Вивер, Н.Г. Голубев, М.С. Жданов), либо по средством использования гибридных алгоритмов композиционного (Вайдельт. Ворд, Прайдмор, Ли, Моррисон, Петрик, Шин, И.С. Барашков, В.И. Дмитриев, Л.А. Табаровский) и декомпозиционного (И.В. Егоров, Ю.В. Завадский, В.В. Никольский, Т.И. Никольская, М.Н. Юдин) типов.

Успешное использование разностных методов решения прямых задач ЭМЗ стало возможным благодаря достаточно высокому уровню развития вычислительных систем. Реализация их на современных ЭВМ применительно к дву- и трехмерным моделям геоэлектрического разреза приводит к необходимости создания комплекса программ, которые должны удовлетворять различным, часто противоречивым, требованиям. Разработка методов решения прямых задач электромагнитных зондирований и построение на их основе математического обеспечения ЭВМ, позволяющего решать класс задач произвольной размерности и любых реальных источников поля, становится все более актуальной.

Машинная графика становится стандартной формой связи человека с компьютером. Интерактивные системы на базе графических дисплеев используются при интерпретации данных различных геофизических методов: сеймики (Смит), электрокаротажа (А.И. Гуменюк, А.Е. Кулинкович), ВЭЗ (Ехансон), грави- и магниторазведки (В.Ф. Пашко, В.И. Старостенко), МТЗ (М.А. Александров, М.Н. Юдин). Диалоговый режим на основе графических дисплеев является наиболее перспективным средством общения с ЭВМ в процессе обработки геофизической информации.

Программное обеспечение разрабатывалось в рамках системы обработки и интерпретации данных геофизических измерений ЭПАК и АЭРОПАК в соответствии с темой XI НШ/101-85-3, предусмотренной Проблемными планами Министерства Геологии СССР на 1975-80 гг. и продолженной на период 1981-85 гг. Кроме того, работы входят в Координационный план исследований по Международному проекту ЭЛАС (электропроводность астеносферы) на 1977-85 гг.

Цель работы. Создание основ автоматизированной системы математического моделирования электромагнитных полей на базе существующей вычислительной техники массового производства в качестве инструмента для решения следующих задач:

- выборе оптимальной методики полевых работ (сети наблюдений оценки частотного диапазона и требуемой чувствительности аппаратуры, выбор оптимального комплекса электроразведочных методов, компонент полей и типов установок и т.п.)
- разработки новых методик интерпретации полевых материалов,

- оценки разрешающей способности электроразведочных методов по отношению к объектам поиска на фоне геологических помех,
- создания систем количественной интерпретации в условиях сложных геоэлектрических разрезов.

Для создания основ такой системы необходимо решить ряд сложных проблем, связанных, главным образом, с разработкой программ моделирования трехмерных электромагнитных полей на современных ЭВМ, что приводит к необходимости выполнения теоретических исследований для обоснования методов и алгоритмов, допускающих получение удовлетворительных по точности решений при небольшом количестве узлов сетки. Это может быть достигнуто декомпозицией сложной задачи (модели) на ряд более простых подзадач (частей общей модели), использованием более сложных аппроксимаций искомого решения на редкой сети и оптимизацией использования ресурсов ЭВМ. Экономия памяти обеспечивается также заменой реальных объектов идеализированными (например, слоев конечной мощности тонкими пленками Прайса-Шейнманна или пленками Дмитриева).

Разностные методы решения задач наряду с вводом данных описывающих модель геоэлектрического разреза, требуют ввода информации математического характера, необходимой для выполнения расчетов.

Этот процесс отображения континуальных геофизических параметров на сетку является трудно формализуемой задачей, требующей для своего решения достаточно высокой квалификации как в области численных методов, так и в геофизике. Для того, чтобы программное обеспечение нашло широкий круг пользователей, геофизик должен работать с ним, не вникая в существо математических методов, алгоритмов и программ, а вводимые в ЭВМ параметры и выдаваемые результаты были бы геофизически значимыми и удобными для практического использования.

При разработке программного обеспечения следует учитывать, что в геофизике графическое представление информации получило широкое распространение в силу компактности ее представления и удобства восприятия, поэтому диалоговый режим общения с ЭВМ в процессе решения прямых и обратных задач представляется наиболее перспективным.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо было решить комплекс взаимосвязанных задач:

1. Построить и обосновать методику численного решения прямых задач ЭМЗ применительно к сложно построенным моделям геоэлектрического разреза и произвольным реальным источникам поля.
2. На базе этой методики создать математическое обеспечение для современных ЭВМ массового использования.

3. Разработать алгоритмы и комплекс сервисных программ, повышающих производительность труда интерпретатора на ЭВМ и обеспечивающих ему комфорт за счет оперирования геофизически значимыми параметрами.

4. Включить программное обеспечение в состав интерактивной графической системы на мини ЭВМ, позволяющей решать прямые и обратные задачи в режиме естественного диалога интерпретаторов с ЭВМ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Развита декомпозиционный альтернирующий метод (ДАМ), обобщающий алгоритм Шварца на скалярные и векторные задачи геоэлектрики. Метод позволяет:

- решение задачи в неограниченном пространстве разделить на две или более простые подзадачи, одна из которых решается численно в ограниченной области, содержащей локальную неоднородность, другая, относящаяся к неограниченной регулярной части геоэлектрического разреза, решается посредством функций или тензоров Грина, аналитически или асимптотическими методами;

- путем вторичной декомпозиции решение сложной внутренней краевой задачи свести к последовательности более простых задач;

- выполнить итерационную рекомпозицию общего решения.

2. Построены вариационные функционалы для решения прямых задач электроразведки применительно к геоэлектрическим разрезам, содержащим проводящие S-пленки, как для гармонически изменяющихся, так и нестационарных полей.

3. На основе вариационно-разностного подхода построены вычислительные схемы и разработаны программы, учитывающие влияние магнитной и диэлектрической проницаемостей среды, а также эффектов ВП. В методе конечных элементов (МКЭ), благодаря более сложной аппроксимации поля и учету априорной информации о его поведении, получены вычислительные схемы, обеспечивающие достижение удовлетворительной точности на грубых сетках и дающее точные решения магнитотеллурических (МТ) задач произвольной размерности в случае одномерных моделей среды.

4. Разработаны алгоритмы и комплекс сервисных программ, выполняющих анализ модели, формирование размеров области и ее дискретизацию, проектирование на сетку неоднородностей геоэлектрического разреза, включая кусочно-линейные границы раздела сред с различной проводимостью, и т.п., что позволяет:

- существенно уменьшить объем вводимой информации за счет автоматизации рутинных операций численного моделирования,

- получить удовлетворительную точность при небольших затратах памяти ЗШ и времени вычислений,

- обеспечивать легкость и гибкость в использовании большого числа графов вычислений.

5. Показано, что во многих случаях целесообразен переход к численному решению прямых и обратных задач, рассматриваемых на вещественной оси полуплоскости сходимости интеграла Лапласа. Это позволило, в частности, выполнить математическое моделирование двумерных магнитотеллурических полей и отрабатывать методологию решения обратных задач на мини ЭВМ в режиме интерактивного графического диалога.

6. Получена новая геологическая информация в результате интерпретации полевых материалов на основе математических моделей при решении структурных и глубинных задач в различных районах страны, а также установлены новые закономерности поведения электромагнитного поля, выявленные посредством анализа данных вычислительных экспериментов.

Реализация работы. На развитый в работе способ моделирования электромагнитных полей в неоднородных средах ВНИИГеофизикой и МГРИ получена лицензия. Основные научные и методические результаты диссертации реализованы в виде комплекса программ. Программное обеспечение внедрено в следующих научных и производственных организациях:

1. ВНИИГеофизика. Комплекс программ является частью библиотеки ЭПАК, которая используется на вычислительных центрах Министерства Геологии СССР, оснащенных ЭВМ БЭСМ-6.
2. НФО ВНИИГеофизики (БЭСМ-6).
3. Институт океанологии АН СССР (ВС 1040).
4. ВЦ МГУ (первая версия программ, БЭСМ-6).
5. ИГИРНИГМ (г. Ташкент, БЭСМ-6).
6. ДВНЦ АН СССР (г. Южно-Сахалинск). Программное обеспечение адаптировано автором на ЭВМ СУВЕР-173.
7. Южная геофизическая экспедиция УГ Таджикской ССР (ЕС-1033)
8. Институт тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР (г. Хабаровск, БЭСМ-6).
9. ПГО «Енисейгеофизика» (г. Красноярск, БЭСМ-6).
10. Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР (г. Петропавловск-Камчатский, ЕС-1033).
11. Трест. «Якутгеология» (г. Мирный, ВС ЭВМ).
12. Трест «Азнефтегеофизика» МНП СССР (г. Баку, ЕС-1040).
13. МИНХ и ГП (г. Москва, ВЦ АН СССР, БЭСМ-6).
14. ПГО «Центргеофизика» (ЕС-1033, ЕС-1045).

15. ВостСибНИИГГиМС (г. Иркутск, ВС ЭВМ).
16. Геофизическая экспедиция УГ БССР (г. Минск, СМ-2)
17. Новосибирский госуниверситет (СМ-2).
18. МГРИ(СМ-2).
19. Ленинградский университет (ЕС ЭВМ).

Практическая ценность. Разработанное автором программное обеспечение стало рабочей инструментом многих производственных и научных организаций различных министерств и ведомств (Мингео СССР к РСФСР, Миннефть, Мингаз, Минвуз, АН СССР, АН УССР). Интерпретация полевых материалов в сложных геоэлектрических условиях на основе математического моделирования выполнялась в целом ряде районов страны в платформенных (Русская, Сибирская) и складчатых (Афгано-Таджикская депрессия, Кавказ, Урал, Карпаты, Дальневосточная зона молодой складчатости) областях, зонах перехода от материка к океану, при изучении структур краевых прогибов. При этом решались регионально-рекогносцировочные (с целью прогноза нефтегазоносности и оценки зон возможного нефтегазонакопления) и поисковые (поиск и оконтуривание локальных неоднородностей разреза, обусловленных его фациальными изменениями и наличием залежей углеводородов, поиск и оконтуривание неантиклинальных ловушек углеводородов) по основным нефтегазоносным провинциям страны. Были получены новые геологические результаты, детализировавшие ранее существовавшие представления или позволившие выдвинуть принципиально новые гипотезы, лучше согласующиеся с результатами наблюдений. Проверка их потребовала бы больше объемы глубинного бурения. Использование программного обеспечения при интерпретации данных МТЗ позволило уточнить информацию о глубинном строении Земли (существование или отсутствие коровых и астеносферных слоев повышенной проводимости, их геометрические и электрические параметры и пр.). Анализ результатов расчетов позволил ответить на ряд принципиальных вопросов прикладного и научного характера, объяснить поведение практических кривых МТЗ, изучить влияние кровли соленосных отложений. Практическая ценность программного обеспечения определяется также тем, что оно используется в учебном процессе в ряде вузов страны (МГРИ, МИНХ и ГП, Новосибирский госуниверситет).

Экономическая эффективность от внедрения программного обеспечения составляет 70 тыс. рублей на каждом ВЦ Министерства Геологии СССР.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всесоюзных сколах по электромагнитным зондированиям (г. Мукачево, 1978 г.; Баку, 1980 г.; г. Звенигород, 1984 г.) на Всесоюзных семинарах в ИЗМИРАНе (1979, 1981 гг.), на

совещании по геоэлектрике (г. Менделеев 1981 г.), на научных семинарах ВНИИГеофизики (1982, 1984 гг.), на Всесоюзном совещании по численному моделированию электромагнитных полей (г. Львов, 1983 г.), на Всесоюзном семинаре «Образный анализ многомерных данных» (г. Владимир, 1984 г.), на научном семинаре ВМиК М17 (1985 г.), на научных конференциях МГРИ (1975-1985 гг.).

Основное содержание диссертации опубликовано в 42 статьях, двух брошюрах и монографии (в соавторстве). Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения 9 глав и заключения, содержит 296 страниц текста, имеет 35 рисунков, 14 таблиц и список литературы из 274 наименований; имеет приложения.

Главы диссертации имеют следующие названия:

1. Математическая постановка задачи.
2. Декомпозиционный альтернирующий метод.
3. Вариационная формулировка прямых задач.
4. Алгоритмы решения внешних краевых задач.
5. Алгоритмы решения внутренних краевых задач.
6. Моделирование полей на динамических сетках.
7. Реализация декомпозиционного метода.
8. Расчет вещественных полей и интерпретация посредством интерактивной графической системы.
9. Обсуждение результатов моделирования для реальных геоэлектрических разрезов.

Диссертация основана на результатах самостоятельных исследований автора. При ее написании использованы также некоторые результаты, полученные совместно или под его руководством М.А. Александровым, Б.А. Ананевичем, В.В. Веселовским, Е.В. Казанцевой, Е.С. Киселевым. Все алгоритмы и подавляющее число программ разработаны диссертантом.

Инициаторами разработки программ численного моделирования были проф. М.Н. Бердичевский и проф. Л.Л. Ваньян.

Положительное влияние на направление исследований оказали обсуждения, дискуссии и критические замечания д.т.н. И.А. Безрука, проф. М.Н. Бердичевского, проф. Л.Л. Ваньяна, проф. В. И Дмитриева, д.ф.-м.н. И.И. Рокитянского, д.т.н. Б.С. Светова, д.ф.-м.н. Д.Н. Четаева, сотрудников различных кафедр геофизического факультета МГРИ и др. Всем им автор выражает глубокую благодарность.

Автор признателен сотрудникам ВНИИГеофизики и других организаций, предоставивших в его распоряжение результаты расчетов, а также сотрудникам производственных

подразделений («Печорагеофизика», «Узбекгеофизика», КрасСОМЭ и многим другим), чьи материалы были использованы в процессе интерпретации на основе математических моделей по программам автора.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа посвящена численному решению двумерных и трехмерных задач ЭМЗ, представляющих интерес для глубинных, структурных и рудных электромагнитных методов (А.Н. Тихонов, В.И. Дмитриев, Е.В. Захаров, 1980).

Рассмотрим математические модели, на которых базируются решения прямых задач электромагнитных зондирований.

Модель геоэлектрического разреза представляет собой локальную дву- или трехмерную неоднородность, содержащуюся в горизонтально-однородной слоистой среде (нормальном разрезе). Будем считать, что координатная плоскость XOY прямоугольной системы координат совпадает с плоской поверхностью земли, а ось z направлена вниз. Предполагается, что в двумерных моделях свойства среды остаются без изменения в направлении оси x , а по оси y нормальный разрез в общем случае различен слева и справа от неоднородности. При решении трехмерных задач МТЗ локальная неоднородность может содержаться в среде, свойства которой могут изменяться по одной или двум пространственным координатам. При расчете полей искусственных источников полагаем, что трехмерная неоднородность содержится в горизонтально-однородной вмещающей среде.

Проводимости σ , магнитная μ и диэлектрическая ε проницаемости и параметры ВП являются скалярными кусочно-гладкими функциями координат. Границы, на которых свойства среды терпят разрыв, а также поверхности тонких пленок будем считать кусочно-гладкими. Источники поля ограничены в пространстве. Основное внимание уделяется источникам в виде вертикально падающей плоской волны, диполей и кабеля.

Дифференциальные уравнения полей. Уравнения полных и аномальных электрических E и магнитных H полей, вытекающие из уравнений Максвелла, имеют общий вид:

$$L\vec{v} + k^2\vec{v}\eta^{-1} = \vec{f}, \quad (1)$$

где $L = \text{rot}\eta^{-1}\text{rot}$, $k^2 = p\mu\hat{\sigma}$, $\hat{\sigma} = \sigma + p\varepsilon$, $\eta = \mu$ ($v = E$) или $\hat{\sigma}$ ($v = H$), f - источники поля. Здесь $p = \bar{p} - i\omega$ - параметр интегрального преобразования Лапласа-Карсона. Он появляется в результате трансформации уравнений Максвелла по времени t (М.Н. Юдин, Л.Л. Ваньян, 1980). При $\bar{p} = 0$ уравнение (1) совпадает с традиционным, получающимся при из-

менении полей по закону $\exp(-i\omega t)$. Если $\omega = 0$, то волновые числа и поля становятся вещественными величинами. Этот случай представляет особый интерес для численного решения многомерных задач. Если в уравнениях Максвелла пренебречь токами смещения, то аналогом (1) для нестационарных полей является уравнение

$$L\vec{v} + q \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{f} \quad (2)$$

в котором смысл коэффициента q и вектора f очевиден. Из (1) и (2) при известных предположениях получают скалярные уравнения, описывающие поведение двумерных полей.

1. Развитый в работе декомпозиционный альтернирующий метод является эффективным средством решения прямых задач ЭМЗ позволяющий получать их решения в произвольной точке плоскости или пространства путем декомпозиции сложной задачи на некоторое количество более простых задач, охваченных единым итерационным процессом. В настоящее время при численном решении задач математической физики все большее распространение получают гибридные алгоритмы. Их можно разделить на две основные группы: композиционные и декомпозиционные.

Большинство известных комбинированных методов решения прямых задач геоэлектрики относятся к числу композиционных. Суть их состоит в построении единой системы алгебраических уравнений для нескольких численных методов, участвующих в решении одной задачи. Это приводит к нарушению простой (ленточной) структуры матрицы системы разностных уравнений и усложнению методов ее решения, а также предъявляет повышенные требования к памяти и быстродействию ЭВМ. Сложность реальных геоэлектрических разрезов и их большая протяженность ограничивают сферу применения комбинированных методов, построенных на композиционной основе, когда моделируемому объекту как единому целому сопоставляется краевая задача. Совершенствование вычислительных средств в обозримом будущем не устранил возникающих затруднений (В.В. Никольский, Т.И. Никольская, 1983).

Более перспективным представляется декомпозиционный подход к численному решению прямых задач. Сложная модель среды (плоскость, пространство) разделяется на несколько подобластей, в каждой из которых автономно находится решение прямой задачи меньшей сложности по сравнению с общей задачей. Искомое решение получается в результате «сшивания» (рекомпозиции) автономных решений для соответствующих подобластей. Этот подход давно известен в прикладной электродинамике («метод частичных областей», Хан, 1941). Он получил дальнейшее развитие в монографии В.В. Никольского и Т.И. Никольской (1983).

Применительно к задачам геоэлектрики гибким и простым в реализации на ЭВМ является декомпозиционный альтернирующий метод (ДАМ), являющийся обобщением алгоритма Шварца на скалярные и векторные задачи ЭМЗ. Он впервые применен автором к решению прямых задач в 1981 году и получил дальнейшее развитие в ряде последующих публикаций. Основное достоинство ДАМ заключается в том, что связь между независимо решаемыми задачами устанавливается через краевые условия и не изменяет вида матриц системы разностных уравнений. Реконструкция общего решения происходит в итерационном процессе, охватывающем все автономные задачи. На этом пути открывается больше число конкретных алгоритмов решения прямых задач.

В работе, основываясь на результатах С.Л. Соболева (1936) и С.Г. Михлина (1952), установлена сходимость ДАМ к решению для задач с самосопряженными дифференциальными операторами (задачи электроразведки на постоянном токе, уравнение Прайса на низких частотах, двумерные и трехмерные задачи с вещественным волновым числом) и определены достаточные условия сходимости. В программном обеспечении реализован алгоритм, сущность которого сводится к следующему.

а). Неограниченная область (плоскость или пространство) разделяется на две налегающие подобласти, одна из которых Ω_1 ограничена и содержит локальную неоднородность, а вторая Ω_2 - не ограничена и соответствует нормальному разрезу. Кроме того, граница $\partial \Omega_1$ области Ω_1 целиком содержится в Ω_2 и наоборот. Задавая первоначально достаточно произвольно краевые условия, например, на $\partial \Omega_1$ численно находится решение первой краевой задачи в $\partial \Omega_1$. Найденное приближенное решение выбирается в качестве краевого условия при решении задачи в области Ω_2 . Последовательно решение внутренней и внешней краевых задач (альтернирование) позволяет построить искомое решение,

б). При решении задачи в области Ω_1 алгоритм позволяет выполнить вторичную декомпозицию - сделать разбиение ее на несколько пересекающихся подобластей и находить в них решения прямыми методами или методом итераций, используя в качестве краевых условий результаты решения в соседних элементарных областях. При итерационном решении системы разностных уравнений в автономных блоках количество итераций будет возрастать в тех подобластях, в которых решение устанавливается наиболее медленно. Эффективность прямых методов также повышается благодаря относительно небольшим размерам подобластей и стандартного числа узлов, используемых для их дискретизации. Вторичная декомпозиция практически снимает ограничения на размеры области и позволяет выполнять моделирование электромагнитных полей для геоэлектрических разрезов большой протяженности. Использование ДАМ предопределяет необходимость решения двух

разнотипных классов краевых задач: внутренних и внешних. В соответствии с этим разработано:

- алгоритмическое и программное обеспечение для расчета неоднородных полей в нормальном разрезе,
- математическое обеспечение для решения двумерных и трехмерных задач.

Сначала рассмотрим алгоритмы решения внешних краевых задач. Строгое решение внешней краевой задачи, например, на основе использования аппарата тензоров (функций) Грина, связано с большими затратами машинного времени (И.С. Барашков, В.И. Дмитриев, 1984), поэтому при разработке алгоритмов расчета полей в слоистой среде автор исходил из необходимости выполнить вычисления за приемлемое время без существенной потери точности решения при сохранении эффективности декомпозиционного подхода. Эти цели достигаются благодаря следующему алгоритму.

а). Для построения решения внешней краевой задачи в нормальном разрезе, подстилающем или перекрывающем локальную неоднородность используются аналитические решения одномерных краевых задач в области Фурье-изображений, согласованные (через граничные значения) с разностным решением внутренней краевой задачи. Для повышения устойчивости вычислений на ЭВМ общее решение обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с кусочно-постоянными коэффициентами в каждом пласте представляется линейной комбинацией двух функций, одна из которых равна 1 в кровле и 0 в подошве пласта, а другая, наоборот, равна 0 в кровле и 1 в подошве. Коэффициенты линейной комбинации находятся в результате решения системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей и равны значениям спектральной плотности поля на границах пластов. Система уравнений решается прогонкой или аналитически. Эффективность расчетов обеспечивается использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), повышенной устойчивостью вычислений и возможностью их распараллеливания.

При решении двумерных задач применительно к моделям среды, имеющим различные нормальные разрезы справа и слева от неоднородности, искомые функции не являются абсолютно интегрируемыми. В этом случае вместо БПФ для вычисления значений полей в произвольных точках полуплоскостей выше и ниже неоднородности используются решения, записанные в виде интегралов свертки для некоторого класса моделей слоистой среды. Программы, основанные на этом алгоритме, несколько уступал БПФ по скорости вычислений, допускают использование неравномерных шагов сетки и произвольное количество интервалов дискретизации.

б). В слоях нормального разреза, содержащих двумерную неоднородность (на достаточно большом расстоянии от нее), искомое решение строится путем согласования коэффициентов асимптотических разложений с разностным решением внутренней краевой задачи. Основой для получения расчетных формул послужили асимптотические дифференциальные уравнения, полученные М.С. Ждановым, И.М. Варенцовым и Н. Г. Голубевым (1982), аналитические решения Г.Г. Обухова и Кюнэтца (Н-поляризация), аналитические решения для кабеля (Е- поляризация) и электрического диполя (трехмерные задачи). Простота полученных асимптотических разложений позволяет быстро находить приближенные решения внешней краевой задачи, необходимые для построения краевых условий на боковых границах сетки. Численные эксперименты свидетельствуют о правомерности и вычислительной эффективности описанного выше подхода к построению приближенного решения в нормальном разрезе.

2. Вариационный подход к решению внутренних краевых задач электромагнитных зондирований позволяет построить класс вычислительных схем, учитывающих априорную информацию о поведении электромагнитного поля и присутствие в модели геоэлектрического разреза неоднородных S-пленок Прайса-Шейнманна и тонких пленок Дмитриева; разностные схемы относительно аномальных полей инвариантны по отношению к источникам возбуждения поля.

Конечно-разностный подход к решению задач математической физики привлекает своей простотой и универсальностью. Он дает неплохие результаты, когда шаги сетки равномерны и достаточно малы. Однако при аппроксимации дифференциального оператора, граничных значений и условия сопряжения на границах раздела в этом случае имеется полная неопределенность (Вазов, Форсайт, 1963). Ситуация улучшится при использовании вариационных формулировок задач.

Распространяясь в среде, электромагнитное поле ведет себя таким образом, что его энергия минимизируется. Вариационная формулировка заключается в построении функционала типа интеграла энергии электромагнитного поля, для которого уравнение Эйлера совпадает с дифференциальным уравнением, вытекающим из уравнений Максвелла.

При построении функционалов для гармонически изменяющегося и нестационарного полей был обобщен подход на электроразведочные задачи, развитый в монографии В.В. Никольского (1967) применительно к электродинамике полых систем. На этом пути оказалось очень легко учесть присутствие в модели среды проводящих S-пленок (при решении задачи относительно электрического поля) и произвольных финитных источников поля. Стационарное значение функционала достигается на функции, удовлетворяющей его

уравнению Эйлера и естественным краевым условиям. Оно находится численно путем аппроксимации интеграла дискретным аналогом. Вычисляя производные от него по неизвестным значениям сеточной функции и приравнивая их нулю, получают систему алгебраических уравнений. Решение ее - суть значения искомой функции в узлах сетки.

Использование МКЭ имеет некоторые преимущества перед МКР. Одно из них состоит в возможности учета априорной информации о поведении электромагнитного поля в пределах элемента, что позволяет существенно повысить точность численного решения задачи на грубой сетке, а также на основе учета асимптотического поведения поля на больших расстояниях от неоднородности ввести в рассмотрение бесконечные элементы. На примере одномерной задачи МТЗ показано, что ее аналитическое и численное решения по МКЭ при использовании по вертикальной оси z специального вида экспоненциальных функций приводит к одной и той же системе уравнений, если узлы дискретизации совпадают с границами раздела пластов слоистого разреза. Это гарантирует совпадение обоих решений. В программах экспоненциальная аппроксимация поведения поля по вертикальной оси в пределах элементов допускается наряду с билинейной (трилинейной) традиционной аппроксимацией. При использовании экспоненциальных пробных функций поля на вертикальных границах (гранях) между узлами сетки могут терпеть разрыв, если соседние элементы имеют различные волновые числа. Недостаток легко устраняется путем незначительного усложнения алгоритмов расчетов. Одновременное использование их имеет следующие преимущества:

1. Экспоненциальная (по оси z) и билинейная (по осям x и y) аппроксимация приводит к тому, что электромагнитное поле в пределах элемента удовлетворяет уравнению (1), если свойства среды в пределах элемента постоянны,

2. В случае МТЗ вычислительные схемы позволяют получить решение экстремальной задачи, совпадающее с аналитическим в двумерном и трехмерном случаях, если модель среда одномерна (свойства среды зависят только от z) и узлы дискретизации совпадают с границами пластов. Как показали численные эксперименты, описанные в работе для тестовых и реальных моделей, использование экспоненциальных пробных функций делает вычислительные схемы устойчивыми по отношению к шагам дискретизации по оси z (Юдин, Веселовский, 1984),

В состав программного обеспечения входят подпрограммы, реализующие три варианта квадратур при решении двумерных задач и три - при решении трехмерных, причем один из вариантов (как в двумерном, так и в трехмерном случае) соответствует методу конечных элементов (МКЭ), в котором использована экспоненциальная аппроксимация по

вертикальной оси (оси z) и асимптотическая - по горизонтальной. Применительно к электрическим полям алгоритмы учитывают присутствие в геоэлектрическом разрезе проводящих неоднородных S -пленок Прайса-Шейнманна и Дмитриева, а в случае магнитных полей - T -пленок Дмитриева.

В комплексе программ реализовано несколько алгоритмов численного решения прямых задач. Это позволяет выполнять внутреннее сравнение результатов расчетов по разным алгоритмам и получать информацию о точности решения.

При расчете аномальных полей источниками поля являются избыточные токи, расположенные в месте сосредоточения локальной неоднородности геоэлектрического разреза и возбуждаемые нормальным полем конкретного источника. Вычислительные схемы для аномального поля инвариантны по отношению к конкретному типу возбудителя поля. Для решения задачи нужно уметь рассчитывать нормальное поле в области, занятой неоднородностью, а также в тех точках, в которых необходимо получить результаты (например, на поверхности земли). В эффективности такого подхода убеждает небольшой объем работ, потребовавшийся для создания программ расчета поля электрического диполя в трехмерной неоднородной среде посредством адаптации программ МТЗ.

Достоверность алгоритмов и разработанного на их основе программного обеспечения подтверждают тестовые расчеты, выполненные для двумерных и трехмерных моделей с источниками в виде плоской волны, электрического диполя и линии конечной длины. Результаты наших расчетов применительно к трехмерным моделям среды сопоставляются с результатами, полученными по методу интегральных уравнений (линия конечной длины; Хоман, 1975), методу конечных разностей (плоская волна, Лайнс, Джонс, 1973) и физическим моделированием (электрический диполь, Яковлев, 1984).

Развиваемая в работе технология численного решения задач (вариационный подход и декомпозиция задачи на более простые) в полной мере применима также к расчету нестационарных полей в неоднородных средах. Альтернирующий метод сходится, т.к. для уравнений параболического типа выполняется принцип максимума. В работе получены вычислительные схемы решения трехмерных внутренних нестационарных задач по методу конечных элементов как обобщение алгоритмов решения задач для гармонически изменяющихся полей.

3. Развитая система сервисных программ в значительной степени освобождает геофизика от весьма трудоемкой рутинной части работы на ЭВМ. позволяет сосредоточить основное внимание на геофизических аспектах математического моделирования, не вникая в тонкости сложных математических методов, лежащих в основе алгоритмов. Моделирование на ЭВМ становится неотъемлемой частью процесса интерпретации экспериментальных

материалов. Подбор модели среды (в интерактивном режиме или полностью формализованной), в некотором смысле адекватной реальным условиям, требует многократного просчета на ЭВМ набора моделей с варьированием параметров среды. Использование в подобном режиме программного обеспечения предъявляет к нему более жесткие требования, чем разовый просчет фиксированной модели. Анализ поведения электромагнитного поля в неоднородной среде в широком диапазоне периодов, изменяющихся примерно на три порядка, оказывается практически невозможным на фиксированной сетке, так как вследствие скин-эффекта она будет использоваться нерационально. Переход к расчету на нескольких сетках потребует ввода большого объема информации о параметрах сетки и распределении неоднородностей, что неизбежно приведет к ошибкам в подготовке данных, существенному замедлению в получении конечного результата, а также потере машинного времени и рабочего времени пользователя. Необходимо учитывать также, что выбор области и параметров её дискретизации в общем случае предъявляет достаточно серьезные требования к квалификации пользователя. Недостаточный уровень его подготовки к работе с программой может привести к ошибочным результатам.

Для преодоления отмеченных трудностей разработано алгоритмическое и программное обеспечение сервисного характера, позволяющее:

- существенно уменьшить объем вводимой информации - по заданному нормальному разрезу и параметрам неоднородности рассчитать размеры сеточной области и параметры её дискретизации,
- проектировать модель геоэлектрического разреза на сформированную сетку,
- обеспечивать легкость и гибкость в использовании большого числа графов вычислений,
- представить результаты расчетов в виде таблиц, графиков и карт.

Объем сервисных программ, реализующих перечисленный круг проблем, в несколько раз превышает объем программ, непосредственно выполняющих расчет электромагнитного поля.

Развитый программный интерфейс, а также инструктивные материалы для пользователей, передаваемые вместе с программами на машинном носителе информации, обеспечили массовое использование ПО в геофизических организациях.

4. Применение преобразования Лапласа-Карсона к уравнениям Максвелла и последующее рассмотрение трансформированных полей на положительной полуоси комплексной плоскости снижает затраты машинного времени и требования к памяти ЭВМ при численном моделировании электромагнитных полей. Результаты расчетов отображают основные качественные закономерности поведения амплитуд комплексного поля и могут

быть пересчитаны в гармонически изменяющиеся или нестационарные поля. Этот подход позволяет экономить память ЭВМ и время решения задач, что открывает возможность отрабатывать методику решения обратных (в том числе двумерных) задач с привлечением интерактивных графических систем на мини-ЭВМ.

Решение трехмерных задач геоэлектрики при гармоническом возбуждении поля в общем виде вызывает серьезные затруднения, обусловленные тем, что система уравнений Максвелла сводится к системе трех дифференциальных уравнений в частных производных для компонент магнитного поля, каждая из которых является комплексной величиной. Фактически необходимо решать систему из шести вещественных дифференциальных уравнений.

Приведенные соображения приводят к необходимости отыскания путей, позволяющих удовлетворительно решать трехмерные задачи на существующей в настоящее время вычислительной технике.

Одним из возможных путей, позволяющий в процессе решения задач перейти к системе трех дифференциальных уравнений для вещественных компонент векторов напряженности электрического или магнитного полей, является использование преобразования Лапласа-Карсона. Рассмотрение трансформированных полей на вещественной положительной оси комплексной плоскости дает возможность работать с вещественными составляющими векторов поля. Этот подход использовался ранее М.Б. Гохбергом для обработки и интерпретации глубинных МТЗ (1963) и автором - при решении прямых и обратных задач применительно к методам ЗС, ЧЗ и МТЗ (Юдин, 1970; Ваньян, Юдин, 1968; Попов, Юдин, 1971; Юдин, Ваньян, 1980). В работе отмечены основные достоинства и недостатки решения прямых и обратных задач в вещественной области.

При решении прямых задач достоинства состоят в следующем:

- требуется вдвое меньше памяти для хранения матриц компонент полей,
- в два раза уменьшается количество разностных уравнений при тех же размерах матрицы сопротивлений,
- в 5-10 раз уменьшается время решения прямой задачи за счет повышения эффективности алгоритмов,
- поведение комплексных, вещественных и нестационарных полей в качественном отношении совпадают,
- вещественное решение может быть использовано для получения решений в комплексной (частотной) и временной областях.

При решении обратных задач малое время решения одного варианта прямой задачи позволяет выполнять интерпретацию в интерактивном диалоговом режиме. Для этого частотные и нестационарные данные можно пересчитывать в вещественную область посредством корректных вычислительных процедур, сводящихся к вычислению интегралов. Рассматриваемый подход имеет один серьезный недостаток: для пересчета вещественных полей и кажущихся сопротивлений в частотную или временную области необходимо решать некорректные задачи - интегральные уравнения первого рода (Юдин, 1970). В диссертации рассмотрено приближенное решение этих интегральных уравнений и приведены результаты численных экспериментов. Приведено также описание методики интерпретации данных МТЗ на двумерных моделях на мини ЭВМ с помощью графического диалога (Юдин, Александров, 1983).

5. Использование средств интерактивного графического диалога на мини-ЭВМ позволяет повысить эффективность применяемой в настоящее время схемы интерпретации данных МТЗ за счет оптимального распределения задач, решаемых на ЭВМ разного класса.

Машинная графика становится стандартной формой связи человека с компьютером. В геофизике графическая форма представления данных в силу ее компактности и удобства восприятия получила традиционно широкое распространение. Это делает графические дисплеи наиболее перспективным средством общения с ЭВМ при интерпретации геофизических материалов в диалоговом режиме.

Если реализация прямой задачи МТЗ для горизонтально-слоистой модели среды не вызывает затруднений с точки зрения ограниченных ресурсов мини ЭВМ, то решение двумерных задач разностными методами на этом классе машин в диалоговом режиме предъявляет повышенные требования к эффективности алгоритмов и технологии программирования. Этим требованиям удовлетворяет программное обеспечение, разработанное для больших ЭВМ на основе описанных в работе подходов. Для увеличения размеров сетки и быстрого действия алгоритмов расчеты выполняются в вещественной области. Благодаря этому максимальный размер сетки равен 20x40. Первый просчет двумерной задачи может длиться от 30 с. до 2 мин. В дальнейшем в процессе диалога решение прямой задачи занимает от 10 до 40 с. на ЭВМ СМ-2.

Декомпозиционный альтернирующий метод расчета и итерационное решение системы разностных уравнений весьма эффективны при интерпретации методом подбора параметров геоэлектрического разреза. Это объясняется тем, что при небольших вариациях параметрами модели решение, полученное для предыдущего варианта модели, является хорошим начальным приближением для последующей. Кроме того, результаты расчетов на

одном из периодов служат основой для построения начального приближения к решению на другом.

Декомпозиционный подход к решению прямой задачи также имеет ряд преимуществ в условиях жестких ограничений на ресурсы мини ЭВМ. Он, в частности, позволяет выполнять интерпретацию путем разделения сложного геоэлектрического разреза на серию более простых моделей с последующим автономным исследованием их на мини ЭВМ в режиме графического диалога и запоминанием полученных результатов в архиве системы. Альтернирующий алгоритм позволяет «сшивать» полученные решения в итерационном процессе, охватывающем все частичные модели. Интерпретатор имеет возможность оперативно управлять работой программы, добиваясь повышения скорости решения прямой задачи.

На основании опытной эксплуатации интерактивной графической системы установлено, что включение программного обеспечения решения прямых одномерных и двумерных задач МТЗ в ее состав в процессе интерпретации позволяет:

- реализовывать режим подбора геоэлектрических моделей на мини ЭВМ в условиях их ограниченного быстродействия и объема памяти, обеспечив при этом естественный режим общения интерпретатора и системы.
- значительно экономить машинное время за счет возможности оперативной декомпозиции моделей и осуществления направленного поиска их параметров интерпретатором,
- повысить качество интерпретации за счет эффективного использования опыта интерпретатора и его интуиции при построении модели на ЭВМ, позволяющих отбраковать заведомо неперспективные варианты поиска решения,
- оперативно исследовать простые модели с целью выявления закономерностей и связей между составляющими полей и параметрами модели среды.

Разработанное программное обеспечение обеспечивает реализацию следующей технологии в процессе интерпретации результатов МТЗ:

- а. Формальную интерпретацию практических кривых на базе одномерных моделей посредством графического диалога на мини ЭВМ.
- б. Исследование фрагментов сложной двумерной модели, построенной на первом этапе, с целью выявления связей элементов геоэлектрического разреза с компонентами полей и кажущегося сопротивления в диалоговом режиме с использованием аппарата аналитического продолжения (мини ЭВМ).
- с. Интерпретация материалов для реальной модели, уточненной на втором этапе (БЭСМ-6, ЕС ЭВМ).

d. Изучение эффектов, обусловленных трехмерностью геоэлектрического разреза, на простых трехмерных моделях, построение которых обеспечивает третий этап интерпретации (БЭСМ-6, ЕС ЭВМ). Эта схема обобщает устоявшуюся последовательность интерпретации с использованием математических моделей (Яковлев, Казанцева, Бердичевский, Дмитриев, Юдин, 1978) за счет использования новых технических средств и матобеспечения.

б. Разработанное программное обеспечение позволяет:

- изучать закономерности поведения электромагнитного поля в неоднородных средах.
- получать носше геолого-геофизические результаты о геометрии и свойствах осадочного чехла и глубинных неоднородностей Земли.

Разработанный комплекс программ численного моделирования электромагнитных полей используется при интерпретации материалов как при решении разведочных, так и глубинных задач. Важным моментом при которой будет выполняться интерпретация результатов (одномерной, двумерной или трехмерной). Для уменьшения объемов вычислений нужно стремиться к аппроксимации реального геоэлектрического разреза математической моделью невысокой размерности. К моделированию трехмерных полей целесообразно прибегать лишь для решения принципиальных вопросов. В связи с этим возникает необходимость в оценке условий того, когда реальную среду можно с заданной погрешностью считать одномерной или двумерной (точнее, квазиодномерной, квазидвумерной). В работе эта проблема решается на основании статистической обработки результатов трехмерного математического моделирования, выполненного по программам автора, а также анализа результатов, полученных другими исследователями (В.И. Дмитриева, М.Н. Бердичевский, А.С. Голубцова, А.С. Дебабов, А.А. Кауфман, Л.А. Табаровский, Вайдельт, Хоман). Получено достаточное условие квазидвумерности, заключающееся в следующем.

Пусть z - расстояние от поверхности земли до верхней кромки неоднородности, а длина неоднородности l в направлении поляризации первичного электрического поля соизмерима с длиной волны λ в однородной вмещающей среде. Тогда при $l > \lambda/2$ и $z < \lambda/2\pi$ в средней части неоднородности по профилю, перпендикулярному направлению поляризации первичного поля, трехмерное поле практически совпадает с двумерным Е-поляризованным полем вне зависимости от соотношения длины и ширины неоднородности.

В случае Е-поляризации на расстоянии, превышающем $\lambda/4$ от края двумерной поверхностной неоднородности, двумерное поле практически совпадает с одномерным (Г.Г. Обухов, Кюнетц, М.Н. Бердичевский, 1968), а оценки квазиодномерности в случае Е-поляризации могут быть сделаны на основании анализа палеточного материала для эллиптического цилиндра, приведенного в работе А.А. Кауфмана, Л.А. Табаровского, С.А. Терентьева

(1971), а также палеток В.И. Дмитриева, Е.В. Захарова, Г.А. Кокотушкина (1971, 1973, 1975).

Согласно установленному достаточному условию квазидвумерности при интерпретации полевых материалов следует учитывать, что в разных частотных интервалах одной и той же кривой МТЗ исследуемое аномалиеобразующее тело может проявлять себя по-разному. Например, может возникнуть ситуация, когда в области относительно высоких частот в центральной его части электрическое поле проявляет себя так же, как в одномерном случае; далее с увеличением периода по некоторым профилям в центральной части модели МТ-поле может быть удовлетворительно аппроксимировано двумерным полем, а на относительно низких частотах к интерпретации результатов нужно подходить всюду уже с учетом трёхмерной неоднородности.

Интерпретация полевых материалов МТЗ с использованием разработанных автором программ численного моделирования двумерных МТ-полей выполнялась в следующих районах нашей страны.

1. Тимано-Печерская нефтегазоносная провинция (ВНИИГеофизика).
2. Юго-Западная Якутия (ВНИИГеофизика),
3. Афгано-Таджикская депрессия (Сурхандарьинская впадина; ИГИРНИГМ, НФО ВНИИГеофизика).
4. Узбекистан (плато Устюрт, Береакельмесский прогиб; ВНИИГеофизика).
5. Юго-западная Туркмения (район Давлетабад-Денмезского месторождения газа; ВНИИГеофизика).
6. Минусинская котловина (ВНИИГеофизика).
7. Иркутский амфитеатр (ВНИИГеофизика, ИО АН СССР),
8. Тунгусская синеклиза (Онекская площадь, Ванавара и др.; ВНИИГеофизика, НФО ВНИИГеофизика).
9. Сахалин (ВНИИГеофизика, НФО ВНИИГеофизика, СахКНИИ ДВНЦ АН СССР).
10. Нарьян-Марская структура (ВНИИГеофизика).
11. Гиссарская и Вахшская долины (Южная геофизическая экспедиция УГ Таджикской ССР).
12. Камчатка (МГУ, институт вулканологии ДВНЦ АН СССР).
13. Дальневосточная зона перехода от материка к океану (ИО АН СССР, МИНХ и ГП).
14. Карпаты (АН УССР).
15. Кавказ (трест «Азнефтегеофизика»).

В указанных организациях решались геолого-геофизические методические задачи по исследованию влияния поверхностных неоднородностей (наклонных границ, солянокупольной тектоники, траппов, а в глубинных задачах - осадочного чехла) на возможность обнаружения глубоко залегающих неоднородностей (кровли складчатого фундамента, газонефтяных ловушек, коровых и астеносферных проводящих слоев и т.д.).

На основе математического моделирования в разных организациях и разными авторами получены следующие результаты.

1. В Тимано-Печерской провинции уточнено положение корового слоя, залегающего на глубине порядка 20 км, и его сопротивление, а также выявлен ряд поисковых признаков наличия рифогенных ловушек (ВНИИГеофизика).

2. В Юго-западной Якутии доказано существование корового проводящего слоя на глубине 20-25 км, в то время как ранее были противоречивые суждения о его наличии в разрезе (Яковлев, Казанцева, Бердичевский, Дмитриев, Юдин, 1978; ВНИИГеофизика).

3. В Сурхандарьинской впадине впервые были получены сведения о рельефе складчатого основания, залегающего на глубине порядка 10 км (ИГИРНИГМ).

4. По Собинской площади (Ванавара) установлены оптимальные периоды, на которых можно получать неискаженную траппами информацию о нижней части разреза (ВНИИГеофизика).

5. Разработаны рекомендации по интерпретации материалов по профилю Чарджоу-Ташкент (НФО ВНИИГеофизика), а также Тунгусской синеклизе и Сурхандарьинской впадине.

6. Изучено влияние на МТ-поле хорошо проводящих включений в земной коре (НФО ВНИИГеофизика; Айхальская аномалия - МИНХ и ГП).

Перечень результатов различной значимости можно было бы продолжить.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Показано, что при численном моделировании электромагнитных полей в многомерных неоднородных средах целесообразно применять декомпозиционный альтернирующий метод (ДАМ). В отличие от аналитических методов, предлагаемый подход естественным образом распространяется на более сложные модели в соответствии с развитием вычислительных средств, включая векторные и многопроцессорные ЭВМ. Установлена сходимость альтернирующего алгоритма для класса электроразведочных задач с самосопряженными дифференциальными операторами (электроразведочные методы на постоянном токе, уравнение Прайса, векторные и скалярные задачи электромагнитных зондирований в вещественной области), а также одномерных задач МТЗ с комплексным волновым числом.

Применительно к многомерным векторным задачам с комплексным волновым числом получены достаточные условия сходимости метода.

2. Для программной реализации ДАМ выполнены следующие работы:

а). Построены вариационные функционалы для гармонически изменяющихся и нестационарных полей, учитывающие присутствие в геоэлектрическом разрезе проводящих пленок Прайса-Шейнманна. На их основе разработано базовое математическое обеспечение для вариационно-разностного решения внутренних краевых задач ЭМЗ неоднородных сред произвольной размерности и различных источников поля. Алгоритмы и программы учитывают влияние эффектов ВП магнитной и диэлектрической проницаемостей среды тонких пленок Прайса-Шейнманна. Посредством МКЭ, благодаря учету априорной информации о поведении поля в конечных элементах, имеется возможность выполнять расчеты на редкой сетке с достаточной для практики точностью.

б). Разработаны программы, обеспечивающие расчет неоднородных электромагнитных полей в нормальном разрезе. Они опираются на аналитические решения внешних краевых задач применительно к горизонтально-однородной модели среды и интегралы асимптотических дифференциальных уравнений до третьего порядка включительно.

3. Разработаны алгоритмы, на базе которых созданы и включены в состав программного обеспечения сервисные процедуры. Они позволили существенно уменьшить объем вводимой информации, повысить надежность расчетов, а также снизить требования к квалификации пользователей за счет оперирования геофизическими значимыми параметрами при вводе их в ЭВМ и получения результатов вычислений в удобном для практического использования виде.

4. Разработаны алгоритмы и программы, позволяющие производить расчеты полей в вещественной области, что существенно упрощает решение многомерных задач на современных вычислительных машинах, позволяет выполнять расчеты двумерных МТ-полей на мини ЭВМ. Этот подход обеспечивает возможность интерпретации данных МТЗ в режиме интерактивного графического диалога посредством одномерных и двумерных математических моделей геоэлектрического разреза, используя недорогие и широко распространенные малые машины, оснащенные графическими дисплеями.

5. Предложена схема интерпретации полевых материалов МТЗ, на разных этапах которой рекомендуется использовать ЭВМ соответствующей мощности, и определяется место графического диалога в процессе решения обратной задачи.

6. Применительно к МТЗ, путем анализа результатов расчета для проводящей трехмерной неоднородности в однородном полупространстве, получено одно достаточное усло-

вие квазидвумерности, выполнение которого позволяет интерпретировать полевые материалы на основе двумерных моделей среда (при ориентации нормального поля вдоль простираения цилиндрической неоднородности).

7. Получено решение для нестационарного поля кабеля, позволяющее рассчитывать процесс становления в произвольной точке однородной земли, а также расчетные формулы, необходимые для разработки программ расчета полей установления по методу конечных элементов в неоднородной среде.

8. Исследованы различные алгоритмы расчета производных по сеточной функции. Установлено, что лучшие результаты дает численное дифференцирование, базирующееся на использовании БПФ. БПФ повышает такие вычислительную эффективность процедур, реализующих аналитическое продолжение двумерных и трехмерных электромагнитных полей в слоистой среде в рамках расчетов посредством ДАМ.

9. Численные эксперименты на тестовых моделях позволяют сделать следующие выводы:

- применение ДАМ позволяет в 5-6 раз уменьшить расстояния до боковых границ сетки, а верхнюю и нижнюю - располагать на расстоянии одного пита сетки от неоднородности,
- реализованный в виде программ вариант МКЭ по отношению к МКР менее чувствителен к изменению лагов сетки по всем координатным осям (особенно по вертикальной оси),
- сопоставление результатов математического моделирования двумерных и трехмерных полей для различных источников с физическим моделированием (диполь), решениями по методу интегральных уравнений и МКР (МТ-поля, линия конечной длины, плоская волна) (по программам других авторов) свидетельствует о достоверности и надежности программного обеспечения,
- посредством ПО можно исследовать влияние на МТ-поле эффектов ВП, магнитной и диэлектрической проницаемостей среды.

10. Разработанные алгоритмы и программы позволили повысить точность и надежность интерпретации и расширить класс решаемых задач.

Внедрение программного продукта во многих научных и производственных организациях создало благоприятные условия для успешного геологического истолкования материалов МТЗ в условиях сложно построенных геоэлектрических разрезов. Об этом свидетельствует большое число новых геолого-геофизических результатов, полученных в различных регионах благодаря использованию программ численного моделирования.

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Об одном способе обработки осциллограмм становления электромагнитного поля. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», №11, 1968, с. 19-124 (соавтор Л.Л. Ваньян).
2. О решении основной задачи электромагнитных зондирований. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», № 5, 1970, с. 111-115.
3. О расчете теоретических кривых становления электромагнитного поля. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», № 5, 1971, с. (соавтор Попов А.А.).
4. Программа расчета магнитотеллурического поля в двумерных слоистых средах, содержащих локальные неоднородности (Е- и Н-поляризации). Изд. ВНИИГеофизика, 1977, 33 с. (соавтор Е.В. Казанцева).
5. К расчету магнитотеллурического поля в неоднородных средах. В кн.: У Всесоюзная школа-семинар по электромагнитным зондированиям. Киев, Наукова думка, 1978, с. 18-19.
6. Результаты математического моделирования магнитотеллурических полей методом сеток. Там же, с. 19-20 (соавторы А.Н. Кузнецов, Е.В. Казанцева, Т.Н. Петрова, И.А. Яковлев, И.Д. Осипова, Н.А. Лебедева, И.С. Фельдман).
7. Интерпретация кривых МТЗ с использованием математических моделей. Там же, с. 33-34 (соавторы И.А. Яковлев, Е.В. Казанцева, М.Н. Бердичевский, В.И. Дмитриев).
8. К расчету становления магнитотеллурических полей в двумерной среде. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», М., 1978, деп. в ВИНТИ 13.06.78, № 1957-78 Деп.
9. К расчету нестационарного поля диполя в двумерной осе симметричной среде. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», М., 1978, деп. в ВИНТИ 13.06.78, 6 с., № 1956-78 Деп.
10. К расчету нестационарного поля бесконечно длинного кабеля в двумерной среде. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», М., 1978, деп. в ВИНТИ 9.11.78, 9 с., № 3437-78 Деп.
11. Об ускорении сходимости итерационного процесса при расчете магнитотеллурического поля методом сеток. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», М., 1978, деп. в ВИНТИ 22.06.78, 7 с., № 2098-78 Деп.
12. Об оценке расстояний от поверхности земли до верхней границы сетки при расчете магнитотеллурического поля методом конечных разностей для несимметричных моделей среды. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка» М., 1978, деп. в ВИНТИ 9.11.78, 8 с., № 3438-78 Деп.

13. К вопросу о применении метода сеток для решения прямой задачи МТЗ. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка, М., 1977, деп. в ВИНТИ, 18.10.77, с.2-5, № 4022-77 Деп (соавтор Е.В. Казанцева).

14. Вычисление коэффициентов разностной схемы на основе вариационного подхода при решении прямой задачи геоэлектрики методом сеток в трехмерной среде. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка», 1981. деп, в ВИНТИ 23.03.81, 14 с, № 1295-81 Деп. 32

15. Вычисление коэффициентов разностной схемы на основе вариационного подхода при решении прямой задачи МТЗ методом сеток в двумерной среде. Изв. ВУЗов, сер. «Геология и разведка». М., 1981, деп. в ВИНТИ 29.04.81, 11 с., № 1948-81Деп. (соавтор Е.В. Казанцева).

16. Совместное использование интегральных преобразований и метода сеток в прямых задачах геоэлектрики. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», М., 1981, деп. в ВИНТИ 29.04.81,13 с. № 1949-81 Деп.

17. О численном решения нестационарной задачи МТЗ (Н-поляризация). Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», № 11, с.116-122.

18. Алгоритм итерационного построения граничных условий при решении геолого-геофизических задач. ЭИ «Мат. методы в геологии», № 6, ВИЭМС, 1981, с. 12-19. 19. О влиянии магнитной проницаемости на результаты работ методами магнитотеллурического поля. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», № 6, 1981, с. 99-106 (соавтор И.А. Доброхотова).

20. Расчет магнитотеллурического поля методом конечных разностей в трехмерной неоднородной среде. В сб.: «Проблемы морских электромагнитных исследований». И., ИЗМИРАН, 1980, с. 96- 102.

21. Математическое моделирование магнитотеллурического поля над двумерно-неоднородными геоэлектрическими разрезами. ВИЭМС, ОЦНТИ, сер. 08-10, 1979, 2 с. (соавторы А.Н. Кузнецов, Е.В. Казанцева, Т.Н. Петрова).

22. Алгоритм выбора параметров сетки при расчете магнитотеллурического поля методом конечных разностей. В сб.: «Геомагнитные исследования», № 29, «Радио и связь», М., 1982, с. 91- 95

23. О численном решении трехмерных задач геоэлектрики. В сб.: «Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока», Владивосток, 1980, с. 114-116 (соавтор Л.Л. Ваньян).

24. О расчете магнитотеллурического поля в трехмерной среде методом сеток. В сб.: «Геомагнитные исследования», № 29, М., «Радио и связь», 1982, с. 84-90 (соавтор В.А. Шнейдер).

25. Трехмерное моделирование по методу конечных разностей. В кн.: VI Всесоюзная школа-семинар по электромагнитным зондированиям. М., 1981, с. 73.
26. О применении вариационных принципов в прямых задачах геоэлектрики с гармоническим возбуждением поля. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», М., 1982, деп. в ВИНТИ 2,06.82, 21с., №2756-82 Деп.
27. Применение альтернирующего метода Шварца для численного решения задач геоэлектрики. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», деп. в ВИНТИ 12.03.82, 19 с, №1047-82 Деп.
28. Применение метода конечных разностей для решения прямой нестационарной задача МТЗ (Н-поляризация). Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», № 3, 1983, с. 83-88 (соавтор А.Л. Румшикая).
29. Магнитотеллурическое возбуждение неоднородной астеносферы. ДАН СССР, т. 269, № 5, 1983, с. 1073-1074 (соавтор Л.Л. Ваньян).
30. О влиянии магнитной проницаемости на результаты работ, проводимых методами магнитотеллурического поля. В сб.: «Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока», Владивосток, 1980 с. 99-104 (соавтор И.А. Доброхотова).
31. Альтернирующий метод численного решения задач геоэлектрики. В сб.: Математические методы в геоэлектрике, АН СССР, ИЗМИРАН, 1982, с. 47-52.
32. Об интегро-дифференциальных асимптотических краевых условиях в прямых задачах геоэлектрики. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», № 1, 1984, с. 97-101.
33. О расчете производных по сеточной функции в геоэлектрике. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», № 7, 1982, с. 86-91.
34. Интерпретация магнитотеллурических зондирований неоднородных сред. М., Недр, 1984 - 197 с. (соавторы Л.Л. Ваньян, А.С. Дебабов).
35. Комплекс программ обработки и интерпретации данных электроразведки МТЗ и ЗС (ЭПАК). Инф. листок № 390-83. М., 1983, 3с. (соавторы А.С. Сафонов, Е.С. Киселев, Е.В. Казанцева, М.Н. Дановская, И.И. Сахарова, О.В. Киселева, О.М. Чунарева, В.Б. Гласко, И.А. Безрук, М.И. Кулик, Л.Н. Порохова, Е.Б. Ильина).
36. Алгоритмы решения внешних краевых задач для основных моделей геоэлектрики. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», М., 1984, деп. в ВИНТИ 11.09.84, 40 с., № 6153-84 Деп.
37. Алгоритмы решения двумерных задач геоэлектрики по методу конечных элементов. Изв. ВУЗов, «Геология и разведка», М., 1984, деп. в ВИНТИ 11.09.84, 26 с, № 6154-84 Деп, (соавтор В.В.Веселовский).

38. О численном решении трехмерной задачи геоэлектрики по методу конечных элементов. Изв. ВУЗов, Геология и разведка», 1984. М., 1984, деп. в ВИНТИ 11.09.84, 24 с. № 6426-84Деп.

39. Расчет площадного распределения переменного электромагнитного поля электрического диполя в трехмерной неоднородной среде по методу сеток. Прикладная геофизика. Вып. 113, М., Недра, 1985, с. (соавтор Е.С. Киселев).

40. Система математического обеспечения «Дубна-ВНИИГеофизика». Библиотека программ для обработки геофизических данных на ЭВМ. Ротапринт ВНИИГеофизика. М., 1974-147 с. (соавторы Загинайко В.А., Исаев В.С., Филина Л.В.),

41. Особенности проявления проводящих субвертикальных зон земной коры в магнитотеллурическом поле. Прикладная геофизика. Вып. 104. М., Недра, 1982, с. 103-115 (соавторы А. Н. Кузнецов, К.А. Савинский, Т.Н. Петрова, О.В. Волкова, И.С. Фельдман).

42. Применение графического диалога с мини ЭВМ для интерпретации данных МТЗ на двумерных моделях. В кн.: Проблемы исследования электромагнитных полей на акваториях. М., ИЗМИРАН, 1983, с. 156-161 (соавтор М.А. Александров).

43. Человеко-машинные процедуры регуляризации при аналитическом продолжении электромагнитных полей. Тезисы доклада на Всесоюзной конференции «Образный анализ многомерных данных», (Владимир, 1984). М., 1984, с. 109-111 (соавтор М.А. Александров).

44. Пятая Всесоюзная школа-семинар по электромагнитным зондированиям (обзор). Изв. АН СССР, Физика Земли, №8, 1979, с.105-110 (соавтор Л.Л. Ваньян).

45. Modeling of the electromagnetic field in the Carpatian region. Acta Geodaet. Geophys. et Montanist. Hung. Volume 19 (1 - 2), 1984, pp.139-144 (соавтор И.И. Рокитянский).

