На правах рукописи

УДК 550.837

РГБ ОД
- 5 ИЮН 2000

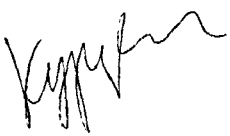
КУРДЮКОВ ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В СЛАБОГРАДИЕНТНЫХ ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2000

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Курского государственного педагогического университета.

Научный руководитель:	кандидат физико-математических наук, доцент Соболев С.В.
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Мартинсон Л.К.
	кандидат физико-математических наук Подосенов С.А.
Ведущая организация:	Объединеннный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

Защита диссертации состоится «16» мая 2000 г. в 11^{30} часов на заседании диссертационного Совета Д 053.15.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим выслать по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ученому секретарю диссертационного Совета.

Автореферат разослан «12» марта 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
д. ф.-м. н., профессор Волков И.К

Д 443.414.18.0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертация посвящена математическому мо-елированию электромагнитных процессов в средах с непрерывной едленно изменяющейся электропроводностью. Областью приложений вляется разведочная геофизика, в круг изучаемых вопросов кото-ой входят задачи, начиная с детального исследования геологиче-кой обстановки крупного города и заканчивая изучением крупно-асштабной структуры Земли, Луны и планет.

При теоретических исследованиях, как правило, предполагают, то по своим физическим свойствам горные породы, слагающие верх-ие слои Земли, являются кусочно-однородными. Например, в элек-оразведке фундаментальными моделями служат среды с кусочно-днородной проводимостью. К настоящему времени достаточно под-обно изучены такие геологические модели как система горизон-альных и вертикальных слоев, шар и цилиндр, погруженные в полу-остранство с иной электропроводностью, и ряд других.

Важнейшей физической характеристикой реального геологическо-о разреза является кажущееся или эффективное сопротивление сре-ы. При реализации метода электрических сопротивлений и при маг-итотеллурическом зондировании оно определяется на основе наземных измерений характеристик электромагнитного поля, а в теорети-еском плане его расчет представляет собой прямую задачу элек-оразведки.

Для более адекватного описания геологических структур необ-одимо учитывать, что довольно часто электрические свойства по-од непрерывно зависят от пространственных координат. Например, ля рудных месторождений характерно плавное изменение удельной лектропроводности с глубиной. Такой же особенностью обладают ноголетнемерзлые грунты. Кроме того, протекание таких геологи-еских процессов как выветривание, высыхание, диффузия, измене-ие солености подземных вод приводят к образованию горных поро непрерывно изменяющейся проводимостью. В подобных случаях ап-роксимация среды моделью, в которой электропроводность является епрерывной функцией координат, очевидно, предпочтительна. Так ядом авторов в различные годы для теоретических расчетов кажу-егося сопротивления в геологические модели закладывались кон-ретные зависимости проводимости среды от координат, преимущест-енно в виде показательной и гиперболической функций. При этом нтерпретация наземных измерений (обратная задача) заключалась точнении числовых коэффициентов этих функций. Развитие ЭВТ от-рыло широкие возможности в использовании полуаналитических ком-инированных методов, основанных на численном решении исходны равнений в подобных задачах. Однако, интерпретация результато астую либо затруднительна, либо требует привлечения ЭВМ высо-ого класса и высококвалифицированного персонала.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью альнейшего развития методов математического обеспечения поиск олезных ископаемых в условиях сред с непрерывно изменяющейс роводимостью для оптимизации процедуры интерпретации результа-ов полевых измерений и снижения на этой основе экономически атрат.

Цель настоящей работы состоит в получении необходимых аналитических и графических зависимостей и разработке достаточно простых алгоритмов, использование которых в условиях полевых измерений занимает достаточно мало времени и не связана с привлечением сложной вычислительной техники.

Методы исследования. Математическую основу диссертации составляет ряд краевых задач уравнений классической теории поля, которые решаются методом последовательных приближений. Считается, что нулевому приближению соответствует среда с однородной проводимостью. Проведены подробные расчеты для первого приближения, учитывающего непрерывную зависимость электропроводности от координат. Сделана оценка второго и последующих приближений с целью обоснования достаточности использования первого приближения в задачах электромагнитного зондирования Земли.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Показана возможность применения метода последовательных приближений при решении ряда краевых задач геологической разведки слабоградиентных сред.

2. Проведены теоретические расчеты потенциала электрического поля и кажущегося сопротивления на основе первого приближения для ряда сред с непрерывной медленно изменяющейся электропроводностью и произвольной функциональной ее зависимостью от одной из пространственных координат (прямая задача).

3. Решена обратная задача вертикального зондирования непрерывно неоднородной среды постоянным электрическим током.

4. Рассчитаны и проанализированы амплитудно-фазовые характеристики импеданса непрерывно неоднородного по глубине полупространства.

Практическая значимость состоит в расширении круга задач, решаемых аналитически, с привлечением ЭВМ лишь на заключительных этапах.

Реализация результатов расчетов. Программы для ЭВМ, созданные на основе теоретических разработок, используются в ГЭП "Юго-запгеология" для расчета кажущегося сопротивления среды и интерпретации результатов наземных измерений вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). При этом оперативно решаются текущие задачи мелкомасштабного поиска ископаемых для производства строительных материалов в интересах областных и районных организаций Курской области. Предложенные программы просты и надежны. В рекомендациях к программам указаны критерии для отбора кривых зондирования, полученных в полевых условиях, с целью решения обратной задачи ВЭЗ предложенным методом, даны оценки погрешностей для различных видов теоретических кривых зондирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод приближенного решения уравнения для потенциала постоянного электрического поля в слабо неоднородной среде.
2. Расчет электрических полей в непрерывно-неоднородных средах, создаваемых различными типами заземлений.
3. Результаты решения ряда краевых задач вертикального электрического зондирования и горизонтального электрического профилирования.

. Способ и решение обратной задачи разведочной геофизики в ме-оде сопротивлений для вертикально-неоднородной среды.

. Расчет и анализ амплитудно-фазовых характеристик импеданса епрерывно-неоднородного полупространства.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на семи-арах лаборатории геофизических полей Института океанологии АН ССР им. П.П. Ширшова, ВНИИ ядерной геофизики и геохимии, отдела еории физико-механических полей Института прикладных проблем еханики и математики АН УССР, Всесоюзном совещании-семинаре "Инженерно-физические проблемы новой техники" (Москва, МГТУ им. Э.Баумана, 1990).

Публикации. Основные результаты опубликованы в 8-ми рабо-ах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, етырех глав, заключения и приложений, включает список использо-анной литературы из 80 наименований. Объем диссертации состав-яет 113 страниц текста, включая 28 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, обсужде-о современное состояние вопроса, сформулирована цель диссерта-ии и кратко изложено ее содержание.

В первой главе рассматривается уравнение для потенциала $U(\vec{r})$ постоянного электрического поля в среде с непрерывно неоднород-ной проводимостью $\sigma(\vec{r})$

$$\Delta U+(\text{grad}\ln\sigma,\ \text{grad}\,U)=0, \qquad (1)$$

дается развернутая запись этого уравнения в наиболее распростра-ненных ортогональных системах координат. Показано, что разделе-ние переменных возможно, когда проводимость среды представляет собой произведение произвольных функций, каждая из которых зави-сит от одной пространственной координаты.

Анализируются уравнения электродинамики для квазистационар-ных процессов при изучении изменяющихся во времени полей в неод-нородных средах. В частности, рассмотрена возможность выбор электродинамических потенциалов электрического и магнитного ти-пов, которые удовлетворяют уравнению Гельмгольца.

Показана возможность применения метода последовательны приближений для решения краевых задач, основанного на предполо-жении о слабоградиентности среды. Глава носит вспомогательны характер.

Вторая глава посвящена апробации первого приближения метод расчета потенциала в ряде прямых и обратных модельных задач средах с центральной и аксиальной симметриями проводимости. Оце нивается погрешность приближения.

В качестве модели 1 рассматривается неограниченная среда, электропроводность которой обладает центральной симметрией и яв ляется непрерыной функцией $\sigma(r)$ сферической системы координат Электрическое поле в среде на бесконечности однородно и имее напряженность $\vec{E}_0$. Реально такая ситуация возникает, например когда центр неоднородности расположен между двумя разноименны

электродами в пределах одной трети их разноса. Потенциал электрического поля $U(\vec{r})$ удовлетворяет уравнению (1) при краевом условии на бесконечности $U(\vec{r})=-\vec{E}_0\vec{r}$. (При определенной ориентации системы координат $U(\vec{r})$ от азимутального угла φ не зависит.) Разделение переменных ($U(\vec{r})=R(r)T(\theta)$) приводит к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям для $R(r)$ и $T(\theta)$, в первое из которых входит $\sigma(r)$. Считая, что проводимость среды является медленно изменяющейся функцией, и представляя R в виде

$$R \cong R_0 + R_1 , \quad R_1 << R_0 , \tag{2}$$

для поправки первого приближения R_1 приходим к уравнению, которое решается методом вариации постоянных. Функция $R_0 = -E_0 r\cos\theta$ соответствует среде с однородной проводимостью $\sigma_0 = const$. В результате потенциал электрического поля $U(\vec{r})$ в первом приближении теории представляется в виде

$$U(\vec{r}) = -E_0 r\cos\Theta\left(1-\frac{1}{r^3}\int_0^r r^2 \ln\frac{\sigma(r)}{\sigma_0}dr\right) \tag{3}$$

Графически выражение (3) иллюстрируется для ряда конкретных зависимостей $\sigma(r)$. Как и следовало ожидать, максимальное возмущение потенциала наблюдается в местах с достаточно большими градиентами проводимости.

Аналогичные результаты получены для среды, обладающей аксиальной симметрией проводимости. Ось Z цилиндрической системы координат совмещена с осью неоднородности, $\sigma(\vec{r})=\sigma(r)$, а электрическое поле вдали от нее однородно и направлено перпендикулярно ей (модель 2).

Критерием применимости рассмотренного первого приближения (2), (3) является неравенство

$$\frac{1}{r} >> \frac{1}{\sigma}\left|\frac{d\sigma}{dr}\right|, \tag{4}$$

накладывающее ограничения на скорость изменения σ вдоль координаты r.

В рамках моделей 1 и 2 удается решить и обратную задачу, т.е. по известным (измеренным) зависимостям $U(\vec{r})$ получить поведение электропроводности $\sigma(\vec{r})$. Проведено сопоставление решения обратной задачи, основанного на первом приближении, на примере кусочно-однородной среды с истинной проводимостью вида

$$\sigma(r)=\begin{cases}\sigma_0(1+\alpha), & при \quad r\le a\\ \sigma_0, & при \quad r>a\end{cases}, \tag{5}$$

где α - безразмерный коэффициент, принимающий значения от -1 до ∞ и определяющий степень отличия проводимости шара радиуса a от проводимости вмещающей среды. С использованием в качестве "измеренных" значения потенциала прямой задачи, которое для среды вида (5) имеет точное известное решение, показано, что при $-0.5<\alpha<1.5$ относительная погрешность не превышает 10%.

Наиболее распространенными типами источников поля в электроразведке служат точечное и линейное заземления. Следующими, рассматриваемыми в главе 2 геоэлектрическими разрезами, являются модель 3 (сферическая симметрия проводимости) и модель 4 (аксиальная), а источниками поля служат соответственно точечное и линейное заземления, совпадающие с центром и осью симметрии проводимости и лежащие на поверхности полупространства. Постановка задачи аналогична предыдущей. Краевыми же условиями являются равенство нулю нормальной производной потенциала на поверхности и известное поведение потенциала поля при $r \to \infty$. Кроме того, вблизи заземления потенциал должен иметь особенность, отвечающую типу источника поля. Для конкретных зависимостей $\sigma(r)$ приведены соответствующие графики.

Две последние прямые задачи электроразведки допускают точные решения, даже в случае произвольной зависимости $\sigma(r)$. Сопоставление первого приближения и точного результата проведено на примере зависимости

$$\sigma(r) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{r}{a}\right)^2 \exp\left(-\frac{r}{a}\right), \quad \sigma_1 = const.$$

Установлено, что наибольшее расхождение наблюдается для тех значений r, в которых отклонения электропроводности от значения σ_0 также максимальны. Относительная погрешность возрастает с увеличением отношения $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$ и при $\frac{\sigma_1}{\sigma_0}$=0.25; 0.5; 1 составляют, соответственно, 1%; 4% и 12%.

На примере среды с проводимостью

$$\frac{\sigma(r)}{\sigma_0} = 1 + \alpha(r) \qquad (6)$$

для моделей 3 и 4 найдены решения обратных задач, имеющие вид

$$\frac{\sigma(r)}{\sigma_0} = \exp\frac{\alpha(r)}{1+\alpha(r)}. \qquad (7)$$

Относительное отклонение зависимости (7) от (6) для некоторых постоянных значений α представлено в работе в виде таблицы. Например, даже при достаточно большем значении α=1 ($\sigma = 2\sigma_0$) относительная погрешность составляет всего 26%.

В третьей главе рассматриваются краевые задачи, связанные с методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (модель 5) и электрического профилирования (ЭП) (модель 6). В первом предполагается, что проводимость полупространства медленно изменяется с глубиной, во второй – является функцией горизонтальной координаты. Зависимость проводимости от координат не конкретизируется. Источником поля служит электрод, расположенный на поверхности среды, с которого стекает ток силы I. Обычно при рассмотрении подобных сред в качестве моделей выбираются системы однородных и изотропных горизонтальных и вертикальных слоев. Исходным для потенциала поля, как и прежде, является уравнение (1). Краевые условия при решении прямой задачи заданы в виде ра

венства нулю нормальной производной потенциала на поверхности, $U(\vec{r}) \to 0$ при $r \to \infty$ и $U(\vec{r}) \to \frac{I}{2\pi\sigma_0 r}$ при $r \to 0$.

Для расчета потенциала $U(\vec{r})$ на поверхности полупространства (модель 5) используется цилиндрическая система координат, ось z которой перпендикулярна его поверхности, а $\sigma(\vec{r}) = \sigma(z)$. Вследствие аксиальной симметрии задачи $U(\vec{r})$ от координаты φ не зависит. Потенциал поля представляется в виде интеграла

$$U(\vec{r}) = \int_0^\infty R_\lambda(r) Z_\lambda(z) d\lambda, \qquad (8)$$

где функции $R_\lambda(r)$ и $Z_\lambda(z)$ удовлетворяют обыкновенным дифференциальным уравнениям. Уравнения для $Z_\lambda(z)$ содержащее $\sigma(z)$, решается методом последовательных приближений: $Z_\lambda \simeq Z_\lambda^{(0)} + Z_\lambda^{(1)}$. Окончательное выражение для потенциала точечного источника при z=0 имеет вид

$$U(r, z=0) = \frac{I}{2\pi\sigma_0}\left(\frac{1}{r} - 2\int_0^\infty \frac{z' \ln\frac{\sigma(z')}{\sigma_0}}{\left(r^2 + 4z'^2\right)^{3/2}} dz'\right). \qquad (9)$$

Результат (9) для ряда конкретных зависимостей представлены графически.

В модели 6 электропроводность представляется в виде непрерывной функции горизонтальной координаты z. Считается, что точечный источник поля расположен в начале цилиндрической системы координат (r, φ, z) и находится распределение потенциала $U(\vec{r})$ по поверхности полупространства. Для графического представления результатов выбраны конкретные зависимости $\sigma(z)$.

Возможность применения данного метода при решении уравнения (1) равносильна требованию относительной малости поправки первого приближения. Показано, что в моделях 5 и 6 неравенство $\left|U^{(1)}\right| \ll \left|U^{(0)}\right|$ эквивалентно условию

$$\max\left|\ln\frac{\sigma}{\sigma_0}\right| \ll 1. \qquad (10)$$

Для модели 6 на примере геоэлектрического разреза

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_0, & при \ -\infty < z < d, d > 0 \\ \sigma_0(1+\alpha), & при \ d < z < \infty. \end{cases}$$

где α - постоянная, α > -1, приведены оценки погрешности, обусловленные приближенностью исходного метода решения. Точное решение (1) для такого разреза можно получить методом электрических изображений. Найдено, что первое приближение теории дает хорошее качественное согласие с точным решением (1). Что касается количественного совпадения, то при значениях α=0.5 и 2 отличие составляет примерно 1% и 10%, и даже при большой контрастности слоев (α=7) оно чуть больше 30%.

Результаты наиболее важной задачи (модель 5) дают возможность рассчитать кажущееся сопротивление среды. Для его наземных измерений широко используется четырехточечная установка Шлюмберже. В этой установке измерения напряженности электрического поля производятся в точке, которая равноудалена от питающих электродов и лежит на соединяющей их прямой (полярности электродов противоположны). Если среда однородна, кажущееся удельное сопротивление совпадает с удельным сопротивлением полупространства, которое дается формулой

$$\rho = \frac{\pi s^2}{I} E(s), \tag{11}$$

где s – полуразнос установки. Если же среда неоднородна, то, с использованием (9), находится $E(s)$ для такой установки, а (11) приобретает вид:

$$\frac{\rho_k(s)}{\rho_0} = 1 + 6s^3 \int_0^\infty \frac{z \ln \frac{\rho(z)}{\rho_0}}{\left(s^2 + 4z^2\right)^{5/2}} dz. \tag{12}$$

Расчет кажущегося сопротивления реальных геоэлектрических разрезов Климовского участка Воронежской Геологоразведочной Экспедиции проведен по программе для ЭВМ на основе (12) и представлен в Приложении 1 к диссертации.

Выражение (12) позволяет решить наиболее важную в практическом применении обратную задачу: по известным экспериментальным данным $\rho_k(s)$ вертикального электрического зондирования найти зависимость истинного удельного сопротивления ρ от глубины z. В математическом отношении уравнение для $\rho(z)$ (12) представляет интегральное уравнение Фредгольма первого рода. Для численного решения этого уравнения разобьем среду на (n+1) однородных горизонтальных слоев. В результате уравнение (12) сводится к системе линейных алгебраических уравнений, которая является плохо обусловленной. Ее решение ищется методом наискорейшего спуска. Результаты такой задачи рассмотрены на примере шестислойной среды(см. рис.1 и 2).

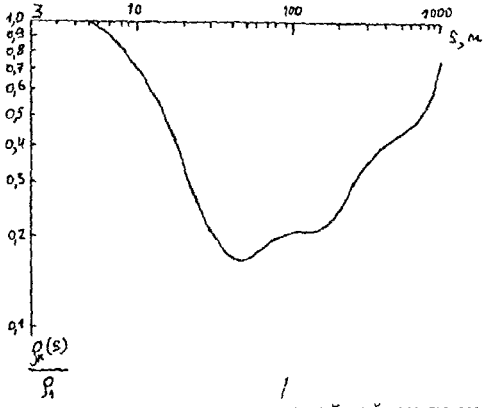


Рис.1 Кажущееся сопротивление шестислойной модели среды.

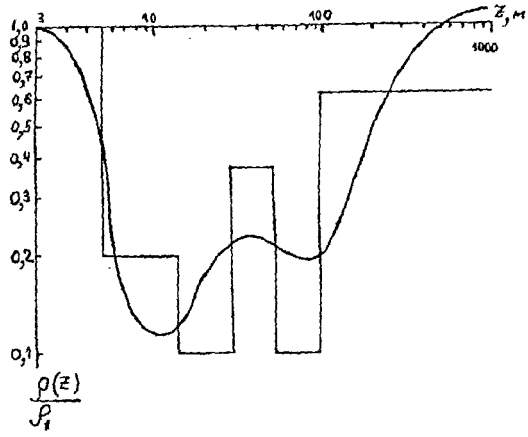


Рис.2 Результат решения обратной задачи - плавная линия, истинное удельное сопротивление среды - ломаная линия.

Для сопоставления результатов решения использован коэффициент взвешенных отклонений двух функций

$$\eta = \frac{\overline{fg} - \bar{f}\bar{g}}{\sqrt{\overline{f^2} - \bar{f}^2}\sqrt{\overline{g^2} - \bar{g}^2}},$$

представленных на рис.2. Величина этого коэффициента в зависимости от глубины z представлена в таблицах:

z, m	3	4,5	6	9	15	25	40
η	1,00	1,00	0,79	0,89	0,92	0,91	0,88

z, m	65	100	150	225	325	500	750	1000
η	0,84	0,84	0,54	0,66	0,60	0,56	0,56	0,57

Следует отметить, что применение используемого метода к данному геоэлектрическому разрезу из-за больших скачков проводимости при переходе от одного слоя к другому не является, вообще говоря, обоснованным. Однако, формальное их применение, как следует из таблицы, дает вполне удовлетворительные результаты.

Применение метода решения обратной задачи к данным Воронежской ГРЭ рассмотрено в Приложении 2.

В главе 4 решена стоящая несколько обособленно задача о магнитотеллурическом зондировании (МТЗ) непрерывно неоднородной среды. Однако, с предыдущим материалом ее объединяет применение

етода последовательных приближений. Кроме этого, как и прежде, читается, что среда слабоградиентна.

В МТЗ исследуется переменная составляющая естественного лектромагнитного поля Земли. Эту составляющую рассматривают как адающую на поверхность Земли волну. Изучение геологического азреза основано на нахождении амплитудно-фазовых характеристик мпеданса Z на поверхности Земли, который определяется как отно-ение горизонтальных составляющих напряженностей электрического и магнитного H полей:

$$Z = \frac{E}{H} \tag{13}$$

частности, кажущееся сопротивление среды выражается через мо-уль импеданса по формуле

$$\rho_k \approx \frac{|Z|^2}{\omega\mu} \tag{14}$$

При падении по нормали на поверхность неоднородного полу-ространства $\sigma=\sigma(z)$ плоской монохроматической волны напряженность лектрического поля $\vec{E}$ в среде удовлетворяет уравнению Гельмголь-а

$$\frac{d^2E}{dz^2} + k^2E = 0, \tag{15}$$

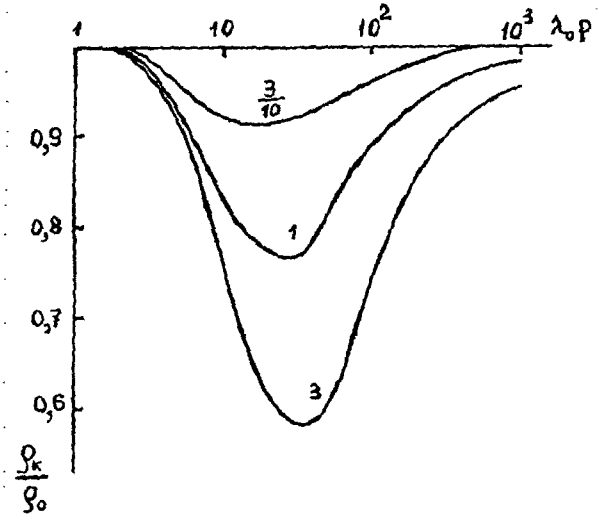
де, в пренебрежении токами смещения, квадрат волнового числа $^2=i\omega\mu\sigma(z)$. Представляя проводимость среды как $\sigma(z) = \sigma_0 + \sigma_1(z)$, $_0=const$, $\sigma_1/\sigma_0 << 1$ записываем k^2 в виде суммы

$$k^2 = k_0^2 + k_1^2, \quad \frac{k_1^2}{k_0^2} << 1 \tag{16}$$

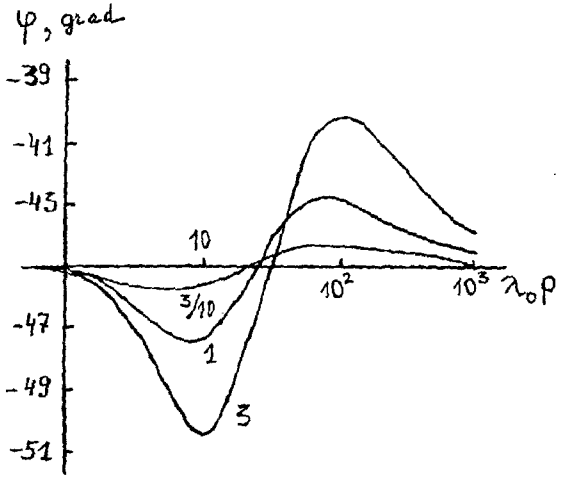
то условие позволяет применить для решения (15) метод последо-ательных приближений. В качестве краевого условия для амплитуды оля $\vec{E}$ использована ее ограниченность при z→∞. В работе получе-ы выражения для $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в первом приближении, на основе которы найдены импеданс полупространства, кажущееся сопротивление сред фаза импеданса в зависимости от длины падающей волны.

Далее в главе 4 рассмотрены некоторые геоэлектрические раз резы. Результаты представлены в виде аналитических выражений графиков (см. рис.3).

Оценка точности полученных результатов проведена на пример вухслойного геоэлектрического разреза, для которого известн очное решение. Полученные приближенные зависимости дают не сколько заниженные значения кажущегося сопротивления и фазы им педанса. Вместе с тем даже при полуторакратном отношении прово имостей сред в месте контакта, когда оно не мало по сравнению единицей и не выполняется условие (16), максимальное отклонени ρ_k и фазы Z от соответствующих им точных значений не превышаю 20% и 5%.



а)



б)

Рис.3 Кажущееся сопротивление (а) и фаза импеданса (б) геоэлектрического разреза проводимости $\sigma=\sigma_0+\sigma_1(pz)\exp(-pz)$, p=const. Шифр кривых - σ_1/σ_0.

Таким образом, использование первого приближения дает вполне удовлетворительные результаты даже в условиях, выходящих за

ки его формальной применимости. Поэтому данные результаты мо
г быть полезными при МТЗ областей с достаточно широким интер-

лом изменения электропроводности как для кусочно-однородных
ед, так и для сред с отличным от нуля градиентом проводимости.

В заключении диссертации формулируются основные результаты
боты.

В приложениях даны программы для ЭВМ и их реализация на
имере данных Воронежской ГРЭ при расчете кажущегося сопротив-
ния ВЭЗ и решения обратной задачи электроразведки.

В приложениях также приведена полная принципиальная схема
оверки адекватности математической модели изучаемому процессу:
спериментальные данные → математическая модель → расчетные
нные. Согласованность расчетных значений с экспериментальными
нными проверяется на основе критерия согласия Колмогорова-
ирнова. Этот же критерий применяется на отдельных этапах: пря-
я и обратная задачи ВЭЗ для реальных данных Воронежской ГРЭ.
люду считается, что уровень значимости $\alpha=0.05$. Рассмотренные
боте модели признаны верными на указанном уровне значимости.

Заключительным, важным и логически завершающим этапом явля-
ся оценка высших приближений для потенциала электрического по-
я в некоторых моделях сред (Приложение 4). Эта оценка позволяе
роводить отбор кривых зондирования верхних слоев Земли с цель
альнейшей интерпретации результатов наземных измерений и оце
ить погрешность теоретических расчетов, оставаясь в рамках пер
ого приближения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы геоэлектрические модели слабо неоднородны
роводящих сред, в которых распределение электропроводности об-
адает центральной и аксиальной симметриями, а также вертикально
горизонтально неоднородные полупространства. Считалось, чт
роводимость изменяется по произвольному закону вдоль одной и
рострастственных координат.

2. Для решения краевых задач электродинамики предложен
еализован метод последовательных приближений. Нулевое приближе
ие соответствует однородной среде. Расчет потенциала электриче
кого поля достаточно подробно проведен для первого приближения
итывающего непрерывное отклонение электропроводности от неко
орого постоянного "фонового" значения.

3. В каждой конкретной модели среды указан критерий, выпо
нение которого делает возможным применение данного метода. Кри
ерий вытекает из вида обыкновенных дифференциальных уравнений
к которым приводит разделение переменных в исходном уравнении
астных производных, или из условия малости поправки первог
риближения по сравнению с нулевым.

4. В качестве источников поля рассматривались: первично од
нородное электрическое поле, постоянные поля точечного и линей
ого заземления, а также внешнее квазистационарное электромаг
нитное поле.

5. Показано, что сопоставление первого приближения с точны
ми решениями на примерах кусочно однородных разрезов дают вполн
удовлетворительные результаты. Такая мера продиктована невозмо

ностью получения точных решений уравнений поля в непрерывно неоднородных средах.

6. Приведены оценки поправок высших приближений для потенциала электрического поля. В результате установлено, что указанные ранее критерии применимости первого приближения являются достаточно жесткими. Использование оценок позволяет расширить область применения первого приближения, указать погрешности этого приближения, что важно в плане практического использования. Аналогичный вывод дает применение критерия согласия Колмогорова-Смирнова.

7. Теоретически получены аналитические зависимости кажущегося сопротивления вертикального непрерывно-неоднородного полупространства от полуразноса четырехточечной симметричной установки (прямая задача вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)).

8. Решена обратная задача вертикального электрического зондирования, исходными данными для которой служат результаты наземных измерений. В ее основе лежит прямая задача ВЭЗ, решение которой получено предлагаемым методом. Для численного решения обратной задачи использован метод наискорейшего спуска.

9. Приведено решение задачи о нормальном падении плоской монохроматической волны на поверхность вертикально неоднородного полупространства. Рассчитан импеданс полупространства и найдена зависимость кажущегося сопротивления и фазы импеданса среды от длины падающей волны.

10. Разработаны программы для ЭВМ и инструкции к ним для расчета кажущегося сопротивления ВЭЗ и интерпретации наземных наблюдений. Предложенные программы используются в ГЭП "Югозапгеология".

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Влияние неоднородности проводимости на распределение потенциала постоянных электрических полей// Изв. АН СССР. Физика Земли.-1983.-N3.-С.108-110.

2. Курдюков Е.П., Соболев С.В. К теории линейного и точечного заземлений в среде с неоднородной электропроводностью//Изв. АН СССР. Физика Земли.-1984.-N5.-С.101-104.

3. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Распределение потенциала постоянного электрического поля точечного источника на плоской поверхности неоднородного полупространства //Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. - 1985. -N1.-С.61-65.

4. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Расчет электрического потенциала точечного заземления для неоднородной среды (электропроводность изменяется по горизонтали)//Изв. АН СССР. Физика Земли. - 1985. -N5.- С.91-94.

5. Курдюков Е.П., Соболев С.В. К теории магнитотеллурического зондирования неоднородного полупространства//Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. - 1986.-N6. -С.112-116.

6. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Обратная задача вертикального электрического зондирования методом сопротивлений//Инженерно-физические проблема новой техники: Тезисы докладов всесоюзного совещания-семинара. -М., 1990.-С.175-176.

7. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Обратная задача метода сопротивлений для некоторых слабонеоднородных сред//Изв. ВУЗов. Геол. и разведка.-1992.-N3.-С.119-123.

8. Курдюков Е.П., Соболев С.В. Обратная задача вертикального электрического зондирования методом сопротивлений//Изв. РАН. Физика Земли. -1992. -N11.-С.18-22.