

На правах рукописи

УДК 550.837

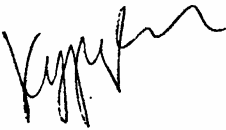
КУРДЮКОВ ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ

**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:

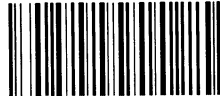
Объединенный институт физики
Земли им. О.Ю. Шмидта

6 » мая 2000 г. в 11³⁰ часов на
3.15.12 при Московском государст-
ве Баумана по адресу: 107005, Мо-

лиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

натью учреждения, просим выслать
ул., д.5., МГТУ им. Н.Э. Баумана,
рета.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1566011

Курдюков Е.П. Математическ

40 г.

1566011

шта,

Волков И.К.

Актуальность темы. Диссертация посвящена математическому моделированию электромагнитных процессов в средах с непрерывной медленно изменяющейся электропроводностью. Областью приложения является разведочная геофизика, в круг изучаемых вопросов которой входят задачи, начиная с детального исследования геологической обстановки крупного города и заканчивая изучением крупномасштабной структуры Земли, Луны и планет.

При теоретических исследованиях, как правило, предполагают, что по своим физическим свойствам горные породы, слагающие верхние слои Земли, являются кусочно-однородными. Например, в электроразведке фундаментальными моделями служат среды с кусочно-однородной проводимостью. К настоящему времени достаточно подробно изучены такие геологические модели как система горизонтальных и вертикальных слоев, шар и цилиндр, погруженные в полупространство с иной электропроводностью, и ряд других.

Важнейшей физической характеристикой реального геологического разреза является кажущееся или эффективное сопротивление среды. При реализации метода электрических сопротивлений и при магнитотеллурическом зондировании оно определяется на основе наземных измерений характеристик электромагнитного поля, а в теоретическом плане его расчет представляет собой прямую задачу электроразведки.

1566011
Для более адекватного описания геологических структур необходимо учитывать, что довольно часто электрические свойства пород непрерывно зависят от пространственных координат. Например, для рудных месторождений характерно плавное изменение удельной электропроводности с глубиной. Такой же особенностью обладают многолетнемерзлые грунты. Кроме того, протекание таких геологических процессов как выветривание, высыхание, диффузия, изменение солёности подземных вод приводят к образованию горных пород с непрерывно изменяющейся проводимостью. В подобных случаях аппроксимация среды моделью, в которой электропроводность является непрерывной функцией координат, очевидно, предпочтительна. Так рядом авторов в различные годы для теоретических расчетов кажущегося сопротивления в геологические модели закладывались конкретные зависимости проводимости среды от координат, преимущественно в виде показательной и гиперболической функций. При этой интерпретации наземных измерений (обратная задача) заключалась в уточнении числовых коэффициентов этих функций. Развитие ЭВТ открыло широкие возможности в использовании полуаналитических комбинированных методов, основанных на численном решении исходных уравнений в подобных задачах. Однако, интерпретация результатов зачастую либо затруднительна, либо требует привлечения ЭВМ высокого класса и высококвалифицированного персонала.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью дальнейшего развития методов математического обеспечения поиска полезных ископаемых в условиях сред с непрерывно изменяющейся проводимостью для оптимизации процедуры интерпретации результатов полевых измерений и снижения на этой основе экономических затрат.

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.

4. Способ и решение обратной задачи разведочной геофизики в методе сопротивлений для вертикально-неоднородной среды.
5. Расчет и анализ амплитудно-фазовых характеристик импеданса непрерывно-неоднородного полупространства.

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

Публикации. Основные результаты опубликованы в 8-ми работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений, включает список использованной литературы из 80 наименований. Объем диссертации составляет 113 страниц текста, включая 28 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, обсуждено современное состояние вопроса, сформулирована цель диссертации и кратко изложено ее содержание.

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

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

дается развернутая запись этого уравнения в наиболее распространенных ортогональных системах координат. Показано, что разделение переменных возможно, когда проводимость среды представляет собой произведение произвольных функций, каждая из которых зависит от одной пространственной координаты.

Анализируются уравнения электродинамики для квазистационарных процессов при изучении изменяющихся во времени полей в неоднородных средах. В частности, рассмотрена возможность выбора электродинамических потенциалов электрического и магнитного типов, которые удовлетворяют уравнению Гельмгольца.

Показана возможность применения метода последовательных приближений для решения краевых задач, основанного на предположении о слабоградиентности среды. Глава носит вспомогательный характер.

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

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

электродами в пределах одной трети их разнoса¹. 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

$$R \cong R_0 + R_1, \quad R_1 \ll R_0, \quad (2)$$

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 $\sigma_0 = \text{const}$. В результате потенциал электрического поля $U(\vec{r})$ в первом приближении теории представляется в виде

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

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

$$\frac{1}{r} \gg \frac{1}{\sigma} \left| \frac{d\sigma}{dr} \right|, \quad (4)$$

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

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

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 электро-разведке 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 $r \rightarrow \infty$. 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

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

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

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

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

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

Относительное отклонение зависимости (7) от (6) для некоторых постоянных значений α представлено в работе в виде таблицы. Например, даже при достаточно большом значении $\alpha = 1$ ($\sigma = 2\sigma_0$) 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 горизонтально 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, $U(\vec{r}) \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$ и $U(\vec{r}) \rightarrow \frac{I}{2\pi\sigma_0 r}$ при $r \rightarrow 0$.

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

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

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

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

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 $|U^{(1)}| \ll |U^{(0)}|$ эквивалентно условию

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

Для модели 6 на примере геоэлектрического разреза

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

где α - постоянная, $\alpha > -1$, 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 $\alpha=0.5$ и 2 отличие составляет примерно 1% и 10%, и даже при большой контрастности слоев ($\alpha=7$) 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 $\vec{E}$ 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

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

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

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

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).

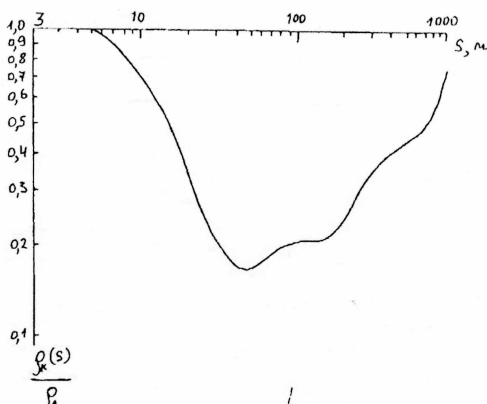


Рис.1 Кажущееся сопротивление шестислойной модели среды.

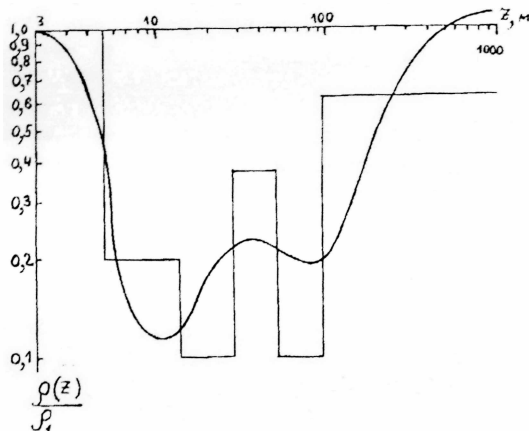


Рис.2 Результат решения обратной задачи - плавная линия, истинное удельное сопротивление среды - ломаная линия.

Для сопоставления результатов решения использован коэффициент взвешенных отклонений двух функций

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

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

метода последовательных приближений. Кроме этого, как и прежде, считается, что среда слабиградиентна.

В МТЗ исследуется переменная составляющая естественного электромагнитного поля Земли. Эту составляющую рассматривают как падающую на поверхность Земли волну. Изучение геологического разреза основано на нахождении амплитудно-фазовых характеристик импеданса Z на поверхности Земли, который определяется как отношение горизонтальных составляющих напряженностей электрического E и магнитного H полей:

$$Z = \frac{E}{H} \quad (13)$$

В частности, кажущееся сопротивление среды выражается через модуль импеданса по формуле

$$\rho_k = \frac{|Z|^2}{\omega \mu} \quad (14)$$

При падении по нормали на поверхность неоднородного полупространства $\sigma = \sigma(z)$ плоской монохроматической волны напряженность электрического поля $\vec{E}$ в среде удовлетворяет уравнению Гельмгольца

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

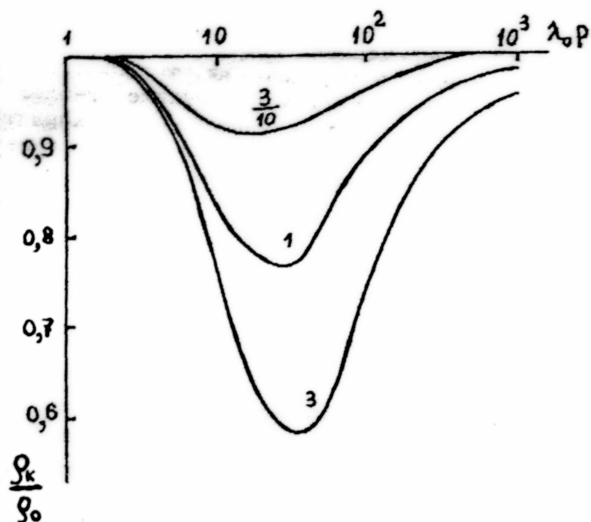
где, в пренебрежении токами смещения, квадрат волнового числа $k^2 = i\omega\mu\sigma(z)$. Представляя проводимость среды как $\sigma(z) = \sigma_0 + \sigma_1(z)$, $\sigma_0 = \text{const}$, $\sigma_1/\sigma_0 \ll 1$ записываем k^2 в виде суммы

$$k^2 = k_0^2 + k_1^2, \quad \frac{k_1^2}{k_0^2} \ll 1 \quad (16)$$

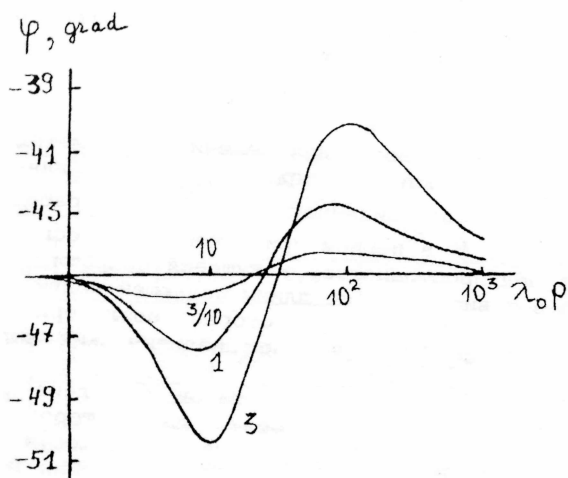
Это условие позволяет применить для решения (15) метод последовательных приближений. В качестве краевого условия для амплитуды поля $\vec{E}$ использована ее ограниченность при $z \rightarrow \infty$. В работе получены выражения для $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в первом приближении, на основе которых найдены импеданс полупространства, кажущееся сопротивление среды и фаза импеданса в зависимости от длины падающей волны.

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

Оценка точности полученных результатов проведена на примере двухслойного геоэлектрического разреза, для которого известно точное решение. Полученные приближенные зависимости дают не сколько заниженные значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса. Вместе с тем даже при полуторакратном отношении проводимостей сред в месте контакта, когда оно не мало по сравнению с единицей и не выполняется условие (16), максимальное отклонение ρ_k и фазы Z от соответствующих им точных значений не превышает 20% и 5%.



а)



б)

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

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

рамки его формальной применимости. Поэтому данные результаты могут быть полезными при МТЗ областей с достаточно широким интер-

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

В заключении диссертации формулируются основные результаты работы.

В приложениях даны программы для ЭВМ и их реализация на примере данных Воронежской ГРЭ при расчете кажущегося сопротивления ВЭЗ и решения обратной задачи электроразведки.

В приложениях также приведена полная принципиальная схема проверки адекватности математической модели изучаемому процессу: экспериментальные данные $\rightarrow$ математическая модель $\rightarrow$ расчетные данные. Согласованность расчетных значений с экспериментальными данными проверяется на основе критерия согласия Колмогорова-Смирнова. Этот же критерий применяется на отдельных этапах: прямая и обратная задачи ВЭЗ для реальных данных Воронежской ГРЭ. Всюду считается, что уровень значимости $\alpha=0.05$. Рассмотренные в работе модели признаны верными на указанном уровне значимости.

Заключительным, важным и логически завершающим этапом является оценка высших приближений для потенциала электрического поля в некоторых моделях сред (Приложение 4). Эта оценка позволяет проводить отбор кривых зондирования верхних слоев Земли с целью дальнейшей интерпретации результатов наземных измерений и оценить погрешность теоретических расчетов, оставаясь в рамках первого приближения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы геоэлектрические модели слабо неоднородных проводящих сред, в которых распределение электропроводности обладает центральной и аксиальной симметриями, а также вертикальным и горизонтально неоднородными полупространства. Считалось, что проводимость изменяется по произвольному закону вдоль одной из пространственных координат.

2. Для решения краевых задач электродинамики предложен реализован метод последовательных приближений. Нулевое приближение соответствует однородной среде. Расчет потенциала электрического поля достаточно подробно проведен для первого приближения, учитывающего непрерывное отклонение электропроводности от некоторого постоянного "фоновое" значения.

3. В каждой конкретной модели среды указан критерий, выполнение которого делает возможным применение данного метода. Критерий вытекает из вида обыкновенных дифференциальных уравнений к которым приводит разделение переменных в исходном уравнении частных производных, или из условия малости поправки первого приближения по сравнению с нулевым.

4. В качестве источников поля рассматривались: первично однородное электрическое поле, постоянные поля точечного и линейного заземления, а также внешнее квазистационарное электромагнитное поле.

5. Показано, что сопоставление первого приближения с точными решениями на примерах кусочно-однородных разрезов дают вполне удовлетворительные результаты. Такая мера продиктована невозмож-

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 проблемы 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.

Подписано к печати 20.03.2000.

Тираж 120 экз. Заказ № 351

Лаборатория информационно-методического обеспечения КГПУ