

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Уральское отделение
Горный институт

В. П. Колесников

**ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

МОСКВА
Научный мир
2007

УДК 550.837
ББК 26.21
К60

В. П. Колесников.

К60 Основы интерпретации электрических зондирований. — М.:
Научный мир, 2007. — 248 с.

ISBN 978-589-176-41-63

В монографии приведены результаты теоретических и экспериментальных работ в области интерпретации электрических зондирований. Дано целостное представление о данной проблеме, начиная от фундаментальных уравнений электродинамики, способов расчета электрических полей для ряда базовых моделей сред, до практической реализации научных наработок в виде компьютерной технологии интерпретации результатов площадных наблюдений. Особое внимание уделено физическому истолкованию основных понятий и интерпретационных параметров, рассмотрению вопросов повышения однозначности решения обратной задачи, распознаванию и подавлению различного рода помех, методологии интерпретационного процесса. Приведены примеры компьютерной интерпретации при решении геологоразведочных, экологических и инженерно-геологических задач.

Для специалистов, занимающихся вопросами интерпретации электроразведочных материалов и студентов ВУЗов, изучающих данную дисциплину.

Библиогр. 212 назв., ил. 64.



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 06-05-78020)

V. P. Kolesnikov. The base of interpretation of electrical soundings. — М.: Scientific world, 2007. — 248 p.

The book contains results of theoretical and experimental work in area of interpretation of electrical sounding. In it complete representation about this problem is given, beginning from the fundamental equations of electrodynamics, methods of calculation of electric fields for number of base models of medium to practical realization of scientific results as computer technology of interpretation of results of the areal observations. Special attention is given to physical interpretation of the basic concepts and interpreting parameters, to viewing of questions of raising of a uniqueness of solution of an inverse problem, identification and inhibition of a various sort of noises, the methodology of interpretive process. The examples of computer interpretation are given at a solution of geological surveyance, ecological and engineering-geological problems.

The book is intended for specialists occupied with questions of interpretation of electroexploratory materials and students of high schools, studying the given discipline. Il. 64, Ref. 212.

УДК 550.837
ББК 26.21

ISBN 978-589-176-41-63

© В. П. Колесников, 2007
© Научный мир, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Основы теории стационарных электрических полей в геологической среде	11
1.1. Фундаментальные уравнения стационарного электрического поля в материальной среде	11
1.2. Электрическое поле источника в однородной изотропной среде	20
1.2.1. Электрические поля различных видов заземлителей ...	20
1.2.2. Электрическое поле, создаваемое несколькими источниками	26
1.2.3. Электрическое поле диполя.....	27
1.2.4. Электрическое поле точечного источника на плоскости	29
1.3. Распределение плотности тока в однородном полупространстве, принцип электрического зондирования ...	30
1.4. Понятие кажущегося сопротивления, виды измерительных установок, принцип взаимности	36
1.5. Поле точечного источника в однородной анизотропной среде.....	46
1.6. Поле точечного источника в горизонтально-слоистой среде.....	54
1.7. Асимптоты кривых зондирования и связь асимптотических значений с обобщенными параметрами среды	67
1.8. Особенности теории постоянного тока в случае поляризующихся сред	80
Глава 2. Теоретические основы интерпретации электрических зондирований.....	83
2.1. О некорректности обратной задачи электрического зондирования и приемах регуляризации.....	83
2.2. Модельность и особенности параметризации обратной задачи электрического зондирования.....	93

2.3. О методологии интерпретации электрических зондирований	98
2.4. Анализ искажений и прединтерпретационная регуляризация полевого материала	101
2.5. Основы качественной интерпретации.....	121
2.6. Способы количественной интерпретации	133
2.7. Геологическое истолкование результатов электрического зондирования	150
2.8. Математическое моделирование электрических полей	159
Глава 3. Компьютерная интерпретация электрических зондирований	169
3.1. Краткая история развития способов интерпретации электрических зондирований с применением ЭВМ.....	170
3.2. Интерпретация электрических зондирований с помощью системы программ ЗОНД	179
3.3. Примеры компьютерной интерпретации	191
3.3.1. Решение региональных геологоразведочных задач	192
3.3.2. Решение экологических задач.....	202
3.3.3. Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания	215
3.3.4. Применение электроразведки при решении задач отработки соляных месторождений.....	223
Литература.....	231

CONTENTS

Introduction	7
Chapter 1. The basiz of the theory stationary electric fields in geological medium	11
1.1. The fundamental equation of a stationary electric field in a material medium	11
1.2. An electric field of a source in a homogeneous isotopic medium	20
1.2.1. An electric field of different views of earths electrode ...	20
1.2.2. An electric field created by several source	26
1.2.3. An electric field of a dipole	27
1.2.4. An electric field of a point source on a plane.....	29
1.3. The distribution of a current in a homogeneous half-space, a principle of electrical sounding	30
1.4. Concept of apparent resistance, views of measuring equipments, principle of mutuality	36
1.5. A field of a point source in a homogeneous anisotropic medium	46
1.6. A field of a point source in a horizontal-stratified medium	54
1.7. Asymptotes of curves soundings and connection of asymptotic values with generalized parameters of medium ...	67
1.8. Features of the direct-current theory in an event of poralized environments	79
Chapter 2. The theoretical basiz of interpretation electrical soundings	83
2.1. About ill-posed of an inverse problem of electrical soundings and receptions of a regularization	83
2.2. Modeled and features of a parametrisation of an inverse problem of electrical soundings	93
2.3. About the methodology of interpretation of electrical soundings	98

2.4. The analysis of contortions and preinterpreting regularization of field material	101
2.5. A basiz of qualitative interpretation	121
2.6. Expedients of the quantitative interpretation	133
2.7. Geologic interpretation of results of electrical soundings.....	150
2.8. Mathematical modeling of electric fields	159
Chapter 3. Computer interpretation of electrical soundings	169
3.1. A brief history of development of expedients of interpretation of electrical soundings with application of a computer.....	170
3.2. Interpretation of electrical soundings with the help of a program system the ZOND	179
3.3. Examples of computer interpretation	191
3.3.1. A solution of regional prospecting problems	192
3.3.2. A solution of ecological problemsq.....	202
3.3.3. Engineering-geologic and hydro-geological surveys	215
3.3.4. Application of geoelectrical prospecting at solving problem working off salt deposits	223
References	231

ВВЕДЕНИЕ

Электрическое зондирование является одним из базовых методов электроразведки. С 30-х годов нашего столетия этот метод успешно применяется при решении широкого круга задач, связанных как с поисками и разведкой месторождений многих полезных ископаемых, так и с проведением различного рода инженерно-геологических, гидрогеологических, экологических, археологических и других видов изысканий.

Благодаря несложности методик наблюдений, низкой себестоимости и экологичности полевых работ, постоянному совершенствованию приемов и методов интерпретации, сфера его применимости непрерывно расширяются.

Наиболее значимые вехи в становлении метода связаны с именами К. Шлюмберже — впервые предложившего этот метод в 1912 году и выполнившего первое электрическое зондирование, В. Р. Бурсиана, А. А. Петровского, А. И. Заборовского, М. А. Пылаева, Е. Н. Каленова, разработавших элементы его теории, методики и практические приемы палеточной интерпретации, способы геологического истолкования результатов измерений, чьи книги, отличающиеся глубиной проработки вопросов, и в настоящее время не потеряли своей высокой научной и практической значимости.

В последующие годы большой вклад в развитие теории и способов интерпретации электрических зондирований внесли отечественные и зарубежные ученые: Л. Л. Ваньян, Б. К. Матвеев, В. К. Хмелевский, Ю. В. Якубовский, М. С. Жданов, Д. Р. Гхош, О. Куфуд, Г. Кунец, научные труды и учебники которых сформировали современные базовые основы электрического зондирования, используемые при подготовке специалистов и в практике ведения электроразведочных работ.

Начиная с 70—80-х годов, намечился качественно новый этап развития метода, связанный с интенсивной компьютеризацией интерпретационного процесса. Значительные успехи, достигнутые в области электроники и вычислительной техники, создавшие предпосылки для значительного повышения технологичности обработки и интерпретации полевых материалов, стимулировали разработку и реализацию различных численных методов решения прямых и обратных задач для одно-, двух- и трехмерных моделей сред.

Результаты исследований, отражающие формирование новой идеологии интерпретационного процесса, создание его математического обеспечения, разработку и реализацию различных способов и программ физического и геологического истолкования материалов зондирования рассмотрены в серии работ [Светов, Бердичевский, 1998; Дмитриев и др. 1973, 1985; Жданов, Спичак, 1984, 1989; Матвеев, 1974; Хмелевской и др. 1988, 1994; Кусков, 1985; Шкабарня и др., 1971, 1985, 1990; Страхов, 1966; Абрамова, 1979; Колесников, 1981; Куфуд, 1984; Шевнин, 1995; Модин и др. 1991, 2004; Бобачев и др. 1996; Dey, Morrisson, 1979; Johansen, 1977; Zohdy, 1975, 1989; Loke, Barker, 1995, 1996; Basokur, 1999 и др.].

Благодаря развитию теоретического, методического и программного обеспечения, выполненному усилиями многих исследователей, были заложены основы для создания компьютерных технологий интерпретации электрических зондирований. Созданные программы численного моделирования электрических полей и выполненные с их помощью исследования значительно обогатили знания относительно возможностей электрического зондирования при изучении неоднородных сред, выявлении и снижении уровня различного рода геологических и техногенных помех.

Вместе с тем, надо отметить, что возможности компьютерной интерпретации еще далеко не исчерпаны. Наиболее технологичным пока остается этап качественной интерпретации, позволяющий путем несложных вычислительных операций, специальных программ визуализации и средств интерфейса, оперативно получать общие представления о пространственном изменении электрических свойств среды.

Что же касается количественной интерпретации, то, несмотря на достигнутые успехи в создании качественно новых компьютерных технологий, доведенных до практического применения, она по-прежнему остается одним из проблемных этапов, требующих продолжения поиска все более эффективных алгоритмов доопределения задачи в условиях ее некорректности и неоднозначности модельного представления объекта исследований. Несмотря на наличие ряда фундаментальных работ в этом направлении, остается неудовлетворенность, связанная с отсутствием достаточно строгих количественных оценок информативности исходных данных, обеспечивающей требуемую детальность расчленения разреза при заданном уровне помех, а также связанную с этим потребность и достаточность того или иного вида дополнительной информации, что предопределяет пока большую долю интуитивно-эмпирической составляющей в технологии количественного истолкования электрических зондирований.

Совершенствование и развитие существующих программ интерпретации электрических зондирований включает как поиск решения фундаментальных проблем, связанных с обеспечением необходимой устойчивости и достоверности получения физико-геологических характеристик изучаемой среды, так и развитие методов анализа эффективных параметров наблюдаемого поля, средств визуализации и сервисных процедур, обеспечивающих оперативное и наглядное отображение основных этапов интерпретации.

К настоящему времени наметилось несколько подходов в организации технологического процесса интерпретации. Одни из них базируются на создании интерактивно-диалоговых систем, позволяющих с помощью определенного набора средств качественной и количественной интерпретации выполнять всесторонний анализ данных, выбирать наиболее информативные интерпретационные параметры и графы обработки для решения конкретной задачи. Эти способы и подходы во многом опираются на огромный опыт физического и геологического истолкования результатов электрического зондирования, накопленный при решении разного рода задач за многие годы его применения и развития. Они предполагают творческий процесс интерпретации и ориентированы на постепенный (по мере развития теоретической базы и опыта работ) переход на все более высокий уровень общения человека и ЭВМ.

Другие подходы нацелены на максимальную технологичность выполнения работ за счет использования современных аппаратурных и компьютерных возможностей с попытками доопределения задачи за счет многократного увеличения числа измерений поля при разных положениях источника и приемных линий. Их реализация выполняется на основе использования многоканальных аппаратурно-программных измерительных комплексов, реализующих томографические методики регистрации и обработки измеряемых величин. [Barker, 1978; Griffiths, Turnbull, 1985; Loke, Barker, 1996; Barker, Moore, 1998; William et al., 2004].

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки как в плане оценки достоверности и физико-геологической содержательности получаемых материалов, так и эффективности их применения при решении различного рода задач.

Следует отметить, что использование всякого нового подхода, согласно негласному «закону сохранения трудностей», не снимает общих фундаментальных проблем решения обратной задачи, которые в каждом случае имеют лишь свои особенности проявления. Информационные

возможности каждого из подходов не могут иметь существенных различий в силу их общих физико-математической основ.

Основная цель при написании данной книги состояла в том, чтобы попытаться составить целостное представление о данной проблеме, начиная с фундаментальных уравнений электродинамики и базовых основ интерпретации, до решения вопросов, связанных с компьютерной реализацией интерпретационного процесса, обобщить некоторый опыт достижений и неудач, высветить основные проблемы и возможные пути их решения.

Работа состоит из трех глав. В первой из них рассмотрены физико-математические основы метода, раскрывающие способы расчета стационарных электрических полей для базовых моделей сред и физическое содержание основных понятий и характеристик среды, используемых при интерпретации электрических зондирований.

Вторая глава посвящена вопросам решения обратной задачи и раскрытию основных элементов, связанных с обработкой и интерпретацией полевых материалов. В ней сделана попытка оценки информационных возможностей метода с позиции существующей теории решения некорректных задач, приведены результаты исследования влияния различного вида помех, рассмотрены физические основы качественной интерпретации и ряд способов количественной интерпретации, вопросы геологического истолкования физических решений и формирования методологии интерпретационного процесса.

Третья глава содержит краткую историю развития методов компьютерной интерпретации и один из вариантов реализации автоматизированной системы на базе теоретического и экспериментального материала предыдущих глав с примерами решения различного рода задач.

Книга содержит часть переработанных материалов их ранее изданной автором работы по данной теме [Колесников, 1981], отражая процесс развития данного направления.

Пользуясь случаем, выражаю искреннюю признательность профессору Б. К. Матвееву, чью благотворную поддержку я постоянно ощущал при написании работы, профессору В. А. Шевнину за доброжелательное творческое общение и присланные весьма ценные научные публикации.

Я приношу огромную благодарность моим коллегам В. А. Кутину и С. В. Мокроносову за многолетнее плодотворное творческое участие в реализации алгоритмов и программ, а также А. В. Татаркину за активное сотрудничество в проведении экспериментальных исследований и большую помощь при подготовке книги к изданию.

Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

1.1. Фундаментальные уравнения стационарного электрического поля в материальной среде

В основе электроразведки лежат фундаментальные уравнения классической электродинамики — четыре уравнения Максвелла.

Существуют интегральная и дифференциальная формы представления этих уравнений. При изучении геологических сред с непрерывным изменением электрических свойств, наиболее приемлемой является дифференциальная форма записи, отображающая электрические явления для любого элементарно малого объема пространства:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \delta; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (1.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \partial \vec{D} / \partial t + \vec{j}_{\text{ст}}. \quad (1.4)$$

где \vec{E} и \vec{D} — характеристики электрического поля (\vec{E} — вектор напряженности, \vec{D} — вектор электрической индукции (или электрического смещения); \vec{B} и \vec{H} — характеристики магнитного поля (\vec{B} — вектор магнитной индукции, \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля); δ — объемная плотность заряда ($\delta = dq/dV$); \vec{j} — плотность электрического тока ($j = dI/dS$); $\vec{j}_{\text{ст}}$ — плотность стороннего тока (тока неэлектрического происхождения, создаваемого внутри источника). В дальнейшем будем полагать $\vec{j}_{\text{ст}} = 0$, рассматривая электрическое поле вне его источников.

Уравнения Максвелла относятся к феноменологическим уравнениям, т. е. они ни откуда не выводятся, а являются результатом обобщения опытных фактов в области электричества и магнетизма. Они раскрывают природу электрического и магнитного полей, их взаимосвязь, а также связь компонент поля с его источниками.

Первое уравнение (1.1), постулирующее, что расходимость вектора электрической индукции \vec{D} в элементарно малом объеме равна объемной плотности зарядов в нем, является обобщением закона Кулона и теоремы Гаусса. Из него следует, что электрическое поле порождается электрическими зарядами и силовые линии его начинаются и заканчиваются на зарядах. При суммарном положительном заряде дивергенция имеет положительное значение, при отрицательном — отрицательное, при нулевом значении, либо при отсутствии зарядов внутри данного объема — дивергенция равна нулю.

Второе уравнение (1.2) отмечает отсутствие в природе магнитных зарядов и вихревом характере магнитного поля. Силовые линии его нигде не начинаются и нигде не заканчиваются, они замкнуты.

Третье уравнение (1.3), полученное Максвеллом в результате обобщения закона электромагнитной индукции Фарадея, говорит о том, что всякое изменение магнитного поля во времени вызывает появление в окружающем пространстве вихревого электрического поля. Это возникающее электрическое поле имеет свои особенности проявления в различных средах. В замкнутом проводнике, к примеру, оно приводит к появлению электрического тока, в диэлектрике — вызывает поляризацию молекул, в вакууме, как мы увидим ниже, — к появлению вихревого магнитного поля. Совместно с уравнением (1.1) уравнение (1.3) объясняет природу образования электрического поля.

Четвертое уравнение (1.4), обобщающее и дополняющее закон полного тока (законы Ампера, Био — Савара — Лапласа), объясняет природу магнитного поля. Из него следует, что причинами появления магнитного поля являются ток проводимости (\vec{j}), представляющий движение заряженных частиц, и открытый Максвеллом, так называемый, ток смещения $\vec{j}_{\text{см}} = \partial \vec{D} / \partial t$, влияние которого определяется скоростью изменения во времени электрического поля \vec{D} . Ток смещения может возникать в любой среде, в том числе и в вакууме, где практически отсутствуют заряженные частицы. По своей сути выражение для $\vec{j}_{\text{см}}$ аналогично закону электромагнитной индукции (1.3). Введение данного тока явилось гениальной догадкой Максвелла. Оно позволило предсказать существование электромагнитных волн, определить скорость их распространения, объяснить природу света и многое другое. Хотя ток проводимости и ток смещения совершенно различны по своей природе, общим для них является способность вызывать появление магнитного поля.

Таким образом, источниками электрического поля могут быть либо заряды, либо меняющееся во времени магнитное поле, а причиной появления магнитного поля служат либо движущиеся заряды, либо переменное электрическое поле.

Уравнения Максвелла, раскрывая природу и взаимосвязь между электрическим и магнитным полями, не содержат в явном виде информации о влиянии на них электрических и магнитных свойств среды — электрического сопротивления (ρ), диэлектрической проницаемости (ϵ) и магнитной проницаемости (μ). Эта связь отображается материальными уравнениями, дополняющими фундаментальные уравнения Максвелла. В случае слабомагнитных, сравнительно медленно меняющихся в пространстве и во времени полей, для области, не занятой источниками сторонней э. д. с., материальные уравнения имеют следующий вид:

$$\vec{D} = \epsilon_{\text{отн}} \epsilon_0 \vec{E}; \quad (1.5)$$

$$\vec{B} = \mu_{\text{отн}} \mu_0 \vec{H}; \quad (1.6)$$

$$\vec{j} = \vec{E}/\rho, \quad (1.7)$$

где $\epsilon_{\text{отн}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость, равная величине отношения напряженности электрического поля в вакууме к напряженности электрического поля в данной среде ($\epsilon_{\text{отн}} \geq 1$); $\mu_{\text{отн}}$ — относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз увеличивается (уменьшается) магнитная индукция в данной среде по сравнению с вакуумом; ϵ_0, μ_0 — соответственно электрическая и магнитная постоянные, появляющиеся при переходе из системы СГСЭ в систему СИ [Сивухин, 1977], ($\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-8}$ Гн/м); ρ — удельное электрическое сопротивление, характеризующее способность среды проводить электрический ток под действием электрического поля. Величину, обратную удельному сопротивлению, называют удельной проводимостью $\sigma = 1/\rho$.

Все дальнейшие изложение материала за некоторыми исключениями, которые будут оговариваться особо, будем выполнять в рамках классической теории электроразведки постоянным током, предполагающей с приемлемой для практики точностью, что изучаемые среды обладают линейностью (линейной зависимостью напряженности E от силы питающего тока); стационарностью ($E(t) = \text{const}$, если $I(t) = \text{const}$); неполяризованностью

(отсутствием аккумуляции зарядов в среде при пропускании в ней электрического тока); пассивностью (нейтральностью среды до включения в ней электрического тока).

Уравнения Максвелла имеют единственное решение для \vec{E} и \vec{B} при заданном распределении заряда и тока. Свойство единственности дает возможность отыскивать решение, угадывая его вид. Проверка правильности выбранного решения определяется путем подстановки его в уравнение Максвелла. Если оно отвечает данному уравнению, то является истинным.

Рассмотрим уравнения Максвелла в случае стационарного электрического поля.

Начнем с уравнения (1.1). При возбуждении постоянного электрического поля в земле все свободные заряды вовлекаются в процесс движения. Данный процесс занимает определенное время, зависящее от электрических свойств среды. Остановимся на этом несколько подробнее, воспользовавшись рассмотренными выше уравнениями.

Возьмем дивергенцию от обеих частей уравнения (1.4)

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = \operatorname{div} \vec{j} + \partial(\operatorname{div} \vec{D})/\partial t.$$

Поскольку дивергенция от замкнутого на себя вихря равна нулю ($\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{H} = 0$), получаем

$$\operatorname{div} \vec{j} = -\partial(\operatorname{div} \vec{D})/\partial t.$$

Используя закон Ома (1.7) и материальное уравнение (1.5), запишем

$$\operatorname{div}(\vec{D}/\epsilon\rho) = -\partial(\operatorname{div} \vec{D})/\partial t,$$

или, с учетом (1.1)

$$\delta/\rho\epsilon = -\partial\delta/\partial t,$$

где $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_{\text{отн}}$.

Выполнив перегруппировку

$$\partial\delta/\delta = -\partial t/\rho\epsilon$$

и взяв интеграл от правой и левой частей равенства, получим

$$\ln \delta + c = -t/\rho \epsilon.$$

Используя начальное условие $t = 0$, находим неизвестную константу $c = -\ln \delta_0$, где δ_0 — начальное значение объемной плотности заряда. Подставив полученное ее выражение в последнее уравнение, находим

$$\ln \delta - \ln \delta_0 = -t/\rho \epsilon,$$

откуда

$$\delta = \delta_0 e^{-t/\rho \epsilon} = \delta_0 e^{-t/\tau},$$

где $\tau = \rho \epsilon = \rho \epsilon_0 \epsilon_{\text{отн}}$ — время релаксации, т. е. время, в течение которого начальная плотность объемного заряда уменьшается в e раз. Подставляя значение ϵ_0 , получаем $\tau = 8,84 \cdot 10^{-12} \rho \epsilon_{\text{отн}}$. То есть в реальных условиях при включении электрического тока объемная плотность заряда достаточно быстро стремится к нулю. К примеру, при изучении осадочных геологических образований (не мерзлых пород), для которых $\epsilon_{\text{отн}}$ обычно не превышает первых единиц, а удельное электрическое сопротивление ρ находится в пределах $10^1 - 10^4$ Ом · м, время релаксации τ составляет не более 10^{-7} с. Поэтому в уравнении (1) можно положить, что вне источников поля $\delta = 0$.

Поскольку в случае стационарных полей $\vec{D}(t) = \text{const}$, $\vec{B}(t) = \text{const}$, система уравнений Максвелла принимает следующий вид:

$$\text{div } \vec{D} = 0, \quad (1.8)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0, \quad (1.9)$$

$$\text{rot } \vec{E} = 0, \quad (1.10)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}. \quad (1.11)$$

Из полученной системы уравнений видим, что единственным уравнением, связывающим параметры поля с электрическими свойствами среды (через посредство закона Ома), является последнее уравнение (уравнение (1.11)). С его помощью могут быть определены как магнитная, так и электрическая компоненты поля. Магнитное поле в каждой точке пространства определяется непосредственно из данного уравнения по заданной величине плотности тока. Примером тому может служить определение магнитного поля линейного проводника, по которому

течет ток силы I . Взяв интеграл от обеих частей уравнения (1.11) по площади замкнутого контура в виде окружности радиуса r и применив формулу Стокса, получим

$$\int_S \text{rot } \vec{H} d\vec{S} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S};$$

или

$$\int_L \vec{H} d\vec{l} = I.$$

Учитывая симметрию точек окружности относительно проводника ($H = \text{const}$) и используя уравнение (1.6), находим выражение для вычисления основной характеристики магнитного поля

$$B = \frac{\mu_0 \mu_{\text{отн}} \cdot I}{2\pi r}. \quad (1.12)$$

Однако изучение геологической среды на основе использования магнитного поля в электроразведке постоянным током практически не применяется. Причинами этого служат, во-первых, небольшие значения наблюдаемого магнитного поля, что нетрудно оценить с помощью формулы (1.12), учитывая, что величина генерируемого тока обычно составляет порядка 0,01–0,1 А, а $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-8}$ Гн/м, во-вторых, весьма низкая информативность магнитной проницаемости, которая для большинства геологических образований, не содержащих ферромагнетиков, близка к единице.

Более информативным в этом плане является удельное электрическое сопротивление пород, связанное с напряженностью электрического поля. Величина сопротивления для различных геологических образований меняется от долей единицы до десятков и сотен тысяч Ом·м. Именно поэтому данный параметр наиболее широко используется в электроразведке постоянным током, а сами электроразведочные методы с использованием постоянного тока обычно называют *методами сопротивлений*.

Приведем формулу (1.11) в виду, связывающему удельное электрическое сопротивление с напряженностью электрического поля.

Взяв дивергенцию от обеих частей уравнения (1.11)

$$\text{div rot } \vec{H} = \text{div } \vec{j},$$

и учитывая, что левая часть полученного уравнения тождественно равна нулю, приходим к выражению, отображающему первый закон Кирхгофа

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (1.13)$$

Величина j в данном уравнении связана с напряженностью поля законом Ома.

$$\vec{j} = \vec{E}/\rho. \quad (1.14)$$

Уравнения (1.13), (1.14) лежат в основе решения прямых задач электроразведки постоянным током. Они могут быть объединены в одно путем подстановки второго из них в первое:

$$\operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \vec{E} \right) = 0$$

или

$$\frac{1}{\rho_x} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho_y} \cdot \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho_z} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0. \quad (1.15)$$

Данное уравнение является исходным для определения напряженности электрического поля. Поскольку \vec{E} является векторной величиной и решение уравнения требует определения трех ее компонент, для упрощения математических операций вектор \vec{E} может быть выражен через скалярную величину U соотношением, отвечающим (1.10):

$$\vec{E} = \pm \operatorname{grad} U,$$

где

$$\operatorname{grad} U = \vec{\nabla} U = \frac{\partial U}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{k}.$$

Символ ∇ (греческая буква набла) носит название оператор Гамильтона.

Величина U имеет физический смысл потенциала электрического поля. По аналогии с электростатикой потенциал можно считать энергетической характеристикой электрического поля, численно равной работе по перемещению заряда из бесконечности в данную точку [Сивухин,

1977]. Из физических соображений можно принять, что потенциал бесконечно удаленных точек равен нулю (энергия поля с удалением от источника стремится к нулю). Поскольку потенциал поля убывает с удалением от источника, градиент потенциала является величиной отрицательной

$$\vec{E} = -\text{grad}U. \quad (1.16)$$

Подставив в выражение (1.15) компоненты вектора \vec{E} :

$$E_x = -\partial U/\partial x, E_y = -\partial U/\partial y, E_z = -\partial U/\partial z,$$

получим

$$\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_y} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1.17)$$

Данное дифференциальное уравнение является исходным для определения потенциала в случае однородной анизотропной среды.

В случае однородной изотропной среды ($\rho_x = \rho_y = \rho_z = \rho$) последнее уравнение представляет уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, \quad (1.18)$$

или в символическом виде $\Delta U = 0$, где $\Delta = \nabla^2$ называется оператором Лапласа, или лапласианом.

Уравнение Лапласа используется в качестве исходного при решении широкого круга прямых задач электроразведки постоянным током. Оно более удобно в математическом отношении по сравнению с уравнением типа (1.15), в отличие от которого решение ищется относительно скалярной величины. Для перехода от получаемого значения потенциала к основной характеристике электрического поля — его напряженности и ее проекциям, достаточно воспользоваться уравнением (1.16).

В общем виде дифференциальное уравнения второго порядка (1.18) имеет бесконечное множество решений, что является следствием появления двух констант при его интегрировании. Для получения единственного значения вводят граничные условия, в качестве которых используют, доказанные в физике, непрерывность потенциала и нормальной составляющей плотности тока на границе раздела сред [Никольский, 1961]:

$$U_i = U_{i+1},$$

$$j_{n_i} = j_{n_{i+1}},$$

или в условиях практического применения:

$$U_i = U_{i+1}, \quad (1.19)$$

$$\frac{1}{\rho_i} \cdot \frac{\partial U_i}{\partial n} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \cdot \frac{\partial U_{i+1}}{\partial n}. \quad (1.20)$$

Таким образом, в теории стационарных полей базовыми уравнениями, вытекающими из уравнений Максвелла и материальных уравнений, являются уравнение Кирхгофа и закон Ома. В случае анизотропной среды они объединяются в уравнение (1.17), а в случае однородной изотропной среды — в уравнение Лапласа (1.18).

Учитывая широкое применение уравнения Лапласа при решении прямых задач, приведем его вид помимо декартовой, также и в цилиндрической и сферической системах координат (рис. 1.1): в цилиндрической системе координат (r, z, φ) :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (1.21)$$

в сферической системе координат (R, θ, φ) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial U}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \\ + \frac{1}{R^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0 \end{aligned} \quad (1.22)$$

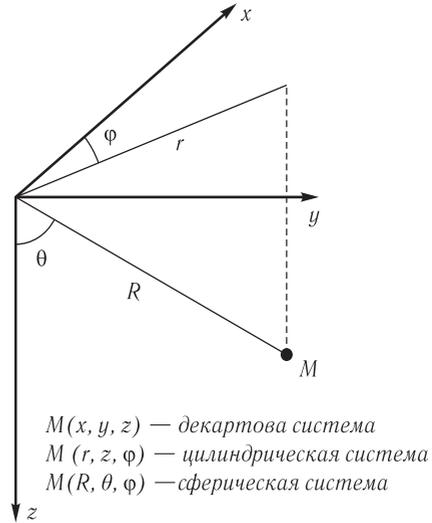


Рис. 1.1. Координаты точки в различных системах координат

1.2. Электрическое поле источника в однородной изотропной среде

1.2.1. Электрические поля различных видов заземлителей

Заземлители, или, как их обычно называют, питающие электроды, служат для подачи в землю электрического тока, вырабатываемого батареей или генератором. Стекающий в землю ток и возбуждаемое при этом электрическое поле в общем случае зависят от формы, размеров заземлителя и его электрического сопротивления, поэтому при выборе измерительных установок и интерпретации материалов важно знать степень влияния данных факторов на результаты полевых измерений.

Обычно при выполнении работ используют металлические заземлители, электрическое сопротивление которых значительно (на несколько порядков) меньше сопротивления вмещающей среды, поэтому при выполнении расчетов можно пренебречь изменением потенциала внутри заземлителя, т. е. считать, что все точки электрода имеют постоянное значение потенциала, а сам электрод представляет объемное эквипотенциальное тело.

Рассмотрим электрические поля, возбуждаемые в земле различными видами заземлителей.

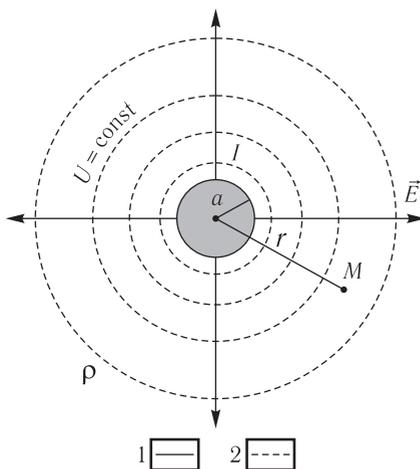


Рис. 1.2. Электрическое поле шарового заземлителя. 1 — силовые линии, 2 — эквипотенциальные линии

Начнем с наиболее простого из них — *шарового заземлителя*, погруженного в однородное пространство (рис. 1.2). Данная модель электрода носит скорее абстрактный, нежели экспериментальный характер, но, как мы увидим ниже, играет важную роль в объяснении электрических полей, создаваемых различными используемыми на практике заземлителями.

Итак, пусть с поверхности шарового заземлителя с радиусом a , расположенного в однородной безграничной среде с удельным сопротивлением ρ , стекает в землю электрический ток силы I .

Возбуждаемое в однородной среде электрическое поле можно графически представить с помощью силовых (токовых) линий, представляющих радиальные прямые, исходящие из центра сферы, и перпендикулярных к ним эквипотенциальных линий — линий равного потенциала, образующих семейство сферических поверхностей (рис. 1.2.). При этом поверхность электрода совпадает с эквипотенциальной поверхностью поля.

Определим электрическое поле данного источника, то есть найдем его напряженность E и потенциал U в произвольно взятой точке M , удаленной от источника на расстояние r ($r \neq 0$), выразив их через заданные величины I , ρ , r .

Искомые характеристики сравнительно просто находятся с помощью закона Ома (1.14). Действительно, выразив плотность тока j в точке M , находящейся на поверхности сферы радиуса r , через силу тока I , $j = \frac{I}{S} = I/4\pi r^2$, получаем

$$E = j \cdot \rho = \frac{I\rho}{4\pi \cdot r^2}. \quad (1.23)$$

Учитывая связь напряженности электрического поля с градиентом потенциала (1.16), запишем

$$dU = -E dr$$

Найдем величину приращения потенциала между точкой M и некоторой точкой N

$$\Delta U = -\int_{r_N}^{r_M} E dr = -\frac{I\rho}{4\pi} \int_{r_N}^{r_M} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{4\pi \cdot r_M} - \frac{I\rho}{4\pi \cdot r_N} = U_M - U_N,$$

где U_M и U_N — соответственно потенциалы поля в точках M и N .

При удалении точки N на достаточно большое расстояние ($r = \infty$) потенциал ее принимает нулевое значение и приращение потенциала становится равным потенциалу точки M

$$\Delta U = U_M = \frac{I\rho}{4\pi \cdot r_M}. \quad (1.24)$$

Из уравнений (1.23), (1.24) следует, что электрическое поле шарового заземлителя определяется величиной стекающего в землю тока,

удельным сопротивлением среды и расстоянием от источника до точки наблюдения. Оно практически не зависит от размера шарового заземлителя и, по сути, совпадает с полем точечного источника.

Рассмотрим случай, когда точка наблюдения M находится на поверхности заземлителя, то есть при $r = a$. Учитывая, что $U_M = \Delta U = U_M - U_\infty$, а $\Delta U/I = R$, получаем

$$R = \frac{\rho}{4\pi \cdot a}. \quad (1.25)$$

Величину R называют *переходным сопротивлением*. По своей сути оно представляет собой сопротивление, оказываемое вмещающей средой электрическому току, стекающему с поверхности заземлителя.

Следует обратить внимание, что R — это сопротивление всей среды от поверхности заземлителя до бесконечно удаленных ее точек. Но поскольку величина R убывает с удалением от источника примерно обратно расстоянию ($R = \rho \cdot l/S = \rho \cdot (r-a)/4\pi r^2$, где $r \gg a$), наибольшее влияние на него оказывают прилегающая к заземлителю часть среды. Величина переходного сопротивления, как следует из (1.25), существенно зависит от размеров заземлителя: чем больше площадь контакта электрода с вмещающей проводящей средой, определяемая радиусом a , тем меньше величина переходного сопротивления.

Рассмотрим далее несколько приближенный к практике вариант — расчет поля *полусферического заземлителя*, расположенного на границе раздела земля — воздух (рис. 1.3).

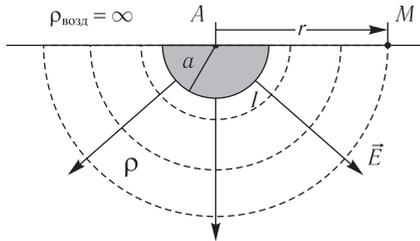


Рис. 1.3. Электрическое поле полусферического заземлителя с границей раздела земля — воздух

Поскольку воздух является практически изолятором, то весь ток, стекающий с заземлителя, будет уходить в нижнее полупространство и, соответственно, плотность его в среде увеличится в два раза относительно случая полного пространства. Поэтому по аналогии со сферическим заземлителем формулы для расчета характери-

стик электрического поля и переходного сопротивления в случае полусферического заземлителя, расположенного на поверхности проводящего полупространства, будут иметь следующий вид:

$$E = (I\rho)/(2\pi \cdot r^2); \quad (1.26)$$

$$U = (I\rho)/2\pi \cdot r; \quad (1.27)$$

$$R = \rho/(2\pi \cdot a). \quad (1.28)$$

Наиболее часто на практике используется заземлитель в виде штыревого металлического стержня — *стержневой заземлитель*.

Обозначим через l длину заглубленной части цилиндрического стержня; a — его радиус. Электрическое поле такого заземлителя, отображенное с помощью силовых и эквипотенциальных линий (взаимно перпендикулярных), показывает, что характер его поведения вблизи и на удалении от заземлителя заметно отличается (рис. 1.4).

Поскольку потенциал на поверхности электрода имеет постоянное значение, эквипотенциальные поверхности поля вблизи электрода повторяют его форму. Их можно приближенно представить в виде полуэллипсоидов вращения с длинной полуосью, направленной вдоль оси заземлителя, а короткой — перпендикулярной ему. По мере удаления от заземлителя соотношение между полуосями уменьшается и при $r \gg l$ эквипотенциальные поверхности становятся близкими по форме к полусферическим поверхностям с радиусом r . То есть характер поведения электрического поля стержневого заземлителя в этом случае становится эквивалентным полю полусферического заземлителя и основные характеристики поля стержневого заземлителя в этом случае могут быть вычислены по формулам (1.23), (1.24).

При расположении точек наблюдения на расстоянии, соизмеримом с длиной электрода, вывод формул для расчета количественных значений параметров поля значительно усложняется. Один из способов решения задачи для данного случая, предложенный А. И. Заборовским [Заборовский, 1963], приводит к следующему выражению для потенциала

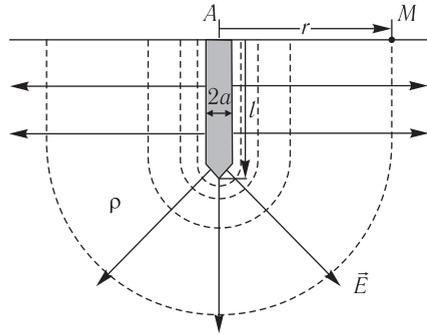


Рис. 1.4. Электрическое поле стержневого заземлителя

$$U = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r} \left(1 - \frac{l^2}{2r^2} + \frac{a^2}{2r^2} - \dots \right). \quad (1.29)$$

Из данной формулы следует, при $r \geq 10 l$ расхождение между полем стержневого и полусферического заземлителей составляет менее 1 %. Учитывая, что в реальных условиях длина заглубленной в землю части электрода составляет обычно не более 20–25 см, электрическое поле стержневого заземлителя будет эквивалентным полю полусферического заземлителя при удалениях точки наблюдения от него на расстояние, превышающее 2,5 м.

Переходное сопротивление стержневого заземлителя в этом случае выражается формулой [Заборовский, 1963]

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \ln \frac{2l}{a}. \quad (1.30)$$

При практической оценке переходного сопротивления величина его умножается на, так называемый, коэффициент прилегания C , характеризующий качество контакта электрода с почвой ($1 < C < 3$). Наименьшее значение ($C = 1$) данный коэффициент имеет при максимальной площади контакта (например, с водой), наибольшее ($C = 3$) при заземлениях в условиях обломочного материала (например, щебня, гравия).

Иногда при работе в условиях высокоомных пород (мерзлые грунты, скальные породы и др.), ввиду аппаратурных ограничений на переходное сопротивление, не всегда удается достичь стабилизации тока. Уменьшения величины переходного сопротивления, согласно формул (1.28), (1.30), можно достичь, используя несколько способов: а) путем увеличения площади соприкосновения электрода с грунтом, например, за счет увеличения глубины его погружения в землю; б) снижения электрического сопротивления грунта вблизи поверхности электрода, например, увлажнив его раствором электролита (соляным, щелочным, кислотным); в) группирования электродов. Параллельное соединение нескольких электродов эквивалентно увеличению площади соприкосновения электрода с землей. Суммарное сопротивление такой группы электродов (при $\Delta X \geq l$) определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}. \quad (1.31)$$

Если положить, что $R_1 = R_2 = \dots = R_n$, переходное сопротивление R будет равно $R = \frac{R_i}{n}$, т. е. уменьшится в n раз.

Формула (1.30), связывающая переходное сопротивление с длиной стержневого заземлителя, помимо общих представлений о возбуждении электрического поля в среде, может быть использована при определении размеров заглубленной части различных объектов (фундаментов, сооружений, свай и др. [Квятковский, 1993]. При этом, необходимое для расчетов переходное сопротивление R , определяется с помощью закона Ома по известной величине генерируемого тока I и измеренной разности потенциалов между объектом и точкой, удаленной на достаточно большое расстояние ($r > 10 l$), а удельное электрическое сопротивление вмещающей среды ρ может быть найдено по результатам количественной интерпретации электрического зондирования.

При использовании данной формулы надо помнить, что она получена в предположении $l \gg a$ (вытянутого полусфероида) и формальное ее применение может привести к неверным выводам (например, при $a = 2l$ можно получить сопротивление $R = 0$).

Помимо стержневого, в практике электроразведки используют и другие виды заземлителей, например, при сложности заглубления электрода (скальные грунты) в качестве заземлителей используют свинцовые пластины — *дисковые заземлители* (рис. 1.5). С помощью вышерассмотренных рассуждений можно показать, что и в данном случае при удалении точек измерений от дискового заземлителя на расстояние, в несколько раз превышающее его размеры, характеристики электрического поля (напряженность и потенциал) с приемлемой для практики точностью могут быть вычислены по формулам для точечного источника (1.23), (1.24).

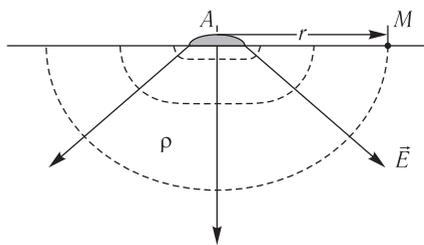


Рис. 1.5. Электрическое поле дискового заземлителя

Таким образом, форма и размеры заземлителя оказывают влияние на электрическое поле только в непосредственной близости к нему. При удалении от заземлителя на расстояние, превышающее примерно в десять раз максимальный линейный его размер, электрические поля, создаваемые

различными видами заземлителей, становятся практически эквивалентными полю точечного источника. Поэтому на практике, где расстояния от источника до точек наблюдения обычно значительно (более чем в 10 раз превышает линейные размеры заземлителя) форма и размеры его не могут оказывать существенного влияния на результаты измерений.

1.2.2. Электрическое поле, создаваемое несколькими источниками

Расчет электрического поля, создаваемого несколькими заземлителями, выполняется с помощью хорошо известного в физике принципа суперпозиции [Сивухин, 1977 и др.]. Согласно этому принципу электрическое поле группы источников равно сумме полей, создаваемых каждым из них в отдельности. При этом, поскольку напряженность E является векторной величиной, результирующее поле получается путем векторного сложения, а при определении суммарного потенциала, являющегося скалярной величиной, используется обычная операция сложения:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i, \quad (1.32)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i. \quad (1.33)$$

Учитывая эту особенность, при определении поля нескольких источников удобнее сначала определить выражение для суммарного потенциала, а затем, воспользовавшись формулой (1.16), определить напряженность электрического поля.

Рассмотрим в качестве примера наиболее часто используемый на практике случай — расчет поля двух электродов, подключенных к полюсам источника (батареи, генератора) (рис. 1.6).

Выберем начало координат в точке A и обозначим $AB = L$, $AM = x$, $MB = L - x$.

Потенциал в точке наблюдения M , согласно принципу суперпозиции и с учетом знаков источников, запишется в виде

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{L-x} \right), \quad (1.34)$$

Используя связь потенциала с напряженностью (1.16), находим компоненту напряженности поля по оси X

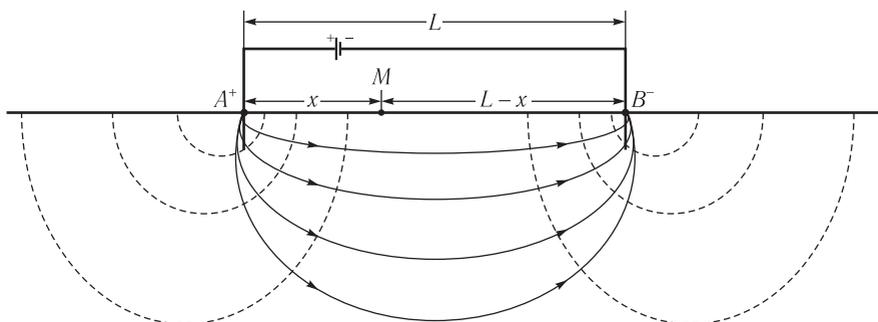


Рис. 1.6. К расчету электрического поля двух заземлителей

$$E_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{x^2} + \frac{1}{(L-x)^2} \right\}. \quad (1.35)$$

Характер поведения потенциала и напряженности поля в интервале между электродами A и B показаны на рис. 1.7.

1.2.3. Электрическое поле диполя

Одним из источников, используемых для возбуждения электрического поля при выполнении электроразведочных наблюдений в ряде методов, является электрический диполь, представляющий собой совокупность двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов, находящихся на некотором удалении друг от друга.

Найдем потенциал, а также ряд составляющих напряженности электрического поля, создаваемых таким источником в произвольной точке M , расположенной от диполя на расстоянии r , значительно превышающем его длину L . Обозначим через θ угол между осью диполя и направлением r , а через r_1 и r_2 — расстояния до точки M от каждого из источников (рис. 1.8). Положим, что диполь ориентирован вдоль оси x .

Согласно принципу суперпозиции потенциал поля в точке M будет равен сумме потенциалов источников, расположенных в точках A и B :

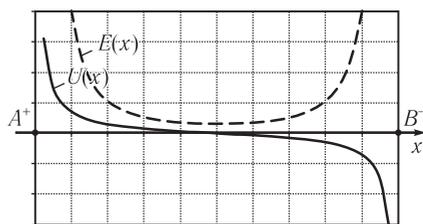


Рис. 1.7. Характер поведения потенциала и напряженности поля в интервале между электродами A и B

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{\Delta r}{r_1 r_2}.$$

Поскольку $r_1 = r + (L/2) \cdot \cos \theta$; $r_2 = r - (L/2) \cdot \cos \theta$ и $\Delta r = L \cdot \cos \theta$, получаем

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{L \cos \theta}{r^2 - (L^2/4) \cos^2 \theta}.$$

При $r \gg L$ имеем

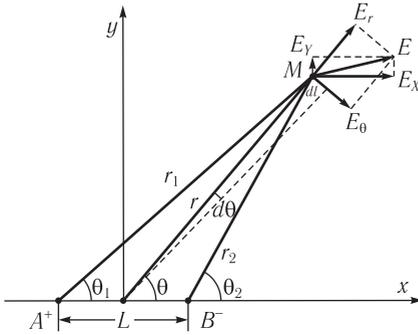


Рис. 1.8. К расчету электрического поля диполя

$$U_M \approx \frac{I\rho}{2\pi} \frac{L \cos \theta}{r^2} = \frac{qL \cos \theta}{r^2}, \quad (1.36)$$

где $q = \frac{I\rho}{2\pi}$.

Взяв производную от U_M по соответствующим направлениям и учитывая, что $\cos \theta = \frac{x}{r}$, найдем составляющие напряженности электрического поля по осям координат, а также радиальную \vec{E}_r и тангенциальную \vec{E}_θ ее компоненты:

$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} \right) = -\frac{qL}{r^3} - qLx \frac{\partial(r^{-3})}{\partial x} = \quad (1.37)$$

$$= -\frac{qL}{r^3} + \frac{3qLx}{r^4} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{qL}{r^3} \left(-1 + \frac{3x^2}{r^2} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{L}{r^3} (3\cos^2 \theta - 1).$$

$$E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} = -qLx \frac{\partial(r^{-3})}{\partial y} = \frac{3qLx}{r^4} \frac{\partial r}{\partial y} = \quad (1.38)$$

$$= 3qL \frac{xy}{r^5} = \frac{3I\rho}{2\pi} \frac{L \cos \theta \sin \theta}{r^3},$$

$$E_r = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{I\rho}{\pi} \frac{L \cos \theta}{r^3}, \quad (1.39)$$

$$E_{\theta} = -\frac{\partial U}{\partial l} = -\frac{\partial U}{r\partial\theta} = \frac{I\rho L \sin\theta}{2\pi r^3}. \quad (1.40)$$

Полученные формулы (1.37)–(1.40) показывают, что напряженность электрического поля диполя убывает обратно пропорционально кубу расстояния, то есть значительно быстрее, чем электрические поля ранее рассмотренных источников.

1.2.4. Электрическое поле точечного источника на плоскости

Особый случай представляет расчет электрического поля на бесконечной проводящей плоскости. Такая задача возникает при моделировании электрических полей с использованием электропроводной бумаги и при измерениях в условиях пленочной проводимости.

Для решения задачи воспользуемся уравнением Лапласа в цилиндрической системе координат (1.21), которое в данном случае — симметрии поля относительно вертикальной оси и $z = 0$ — будет зависеть только от одной величины r и запишется в виде

$$\Delta U = \frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} = 0. \quad (1.41)$$

То есть, определение потенциала сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения. Используя метод понижения порядка, обозначим

$$\frac{dU}{dr} = y(r) = y. \quad (1.42)$$

Уравнение (1.41) переписывается в виде

$$\frac{dy}{dr} + \frac{1}{r}y = 0.$$

Разнеся переменные

$$\frac{dy}{y} = -\frac{dr}{r}$$

и проинтегрировав обе части уравнения, находим:

$$\ln y = -\ln r + \ln C_1.$$

Отсюда получаем

$$y = \frac{C_1}{r}.$$

Подставляя это в (1.42) и учитывая связь градиента потенциала с напряженностью электрического поля (1.16), получаем

$$y = \frac{dU}{dr} = \frac{C_1}{r} = -E. \quad (1.43)$$

Из этого соотношения находим неизвестную константу C_1 и выражения для напряженности и потенциала электрического поля на плоскости

$$C_1 = -E \cdot r = -j\rho \cdot r = -\frac{I\rho}{2\pi},$$

$$E = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r}, \quad (1.44)$$

$$dU = -E dr = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r} dr,$$

$$U = -\frac{I\rho}{2\pi} \int \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi} \ln \frac{1}{r} + C_2,$$

где C_2 — произвольная константа. Полагая, что при удалении точки наблюдения от источника $U \rightarrow 0$, можно принять $C_2 = 0$, тогда последнее соотношение запишется в виде:

$$U = -\frac{I\rho}{2\pi} \int \frac{dr}{r} = \frac{I\rho}{2\pi} \ln \frac{1}{r}. \quad (1.45)$$

Уравнение (1.45) показывает, что электрическое поле точечного источника, расположенного на проводящей плоскости, значительно медленнее убывает с удалением от источника по сравнению с объемным распределением поля. При этом, стремясь к нулю по мере увеличения расстояния r , потенциал имеет логарифмическую особенность при $r = \infty$.

1.3. Распределение плотности тока в однородном полупространстве, принцип электрического зондирования

В электроразведке постоянным током, где проникающим вглубь земли «инструментом» является электрический ток, информативность методов наблюдений определяется в первую очередь распределением

плотности тока в исследуемом пространстве. Рассмотрим это на одном из примеров, раскрывающих принцип электрического зондирования.

Пусть на поверхности однородного изотропного полупространства с удельным сопротивлением ρ расположены два заземлителя A и B , подключенные к полюсам источника, с помощью которых подается в землю ток силы I (рис. 1.9).

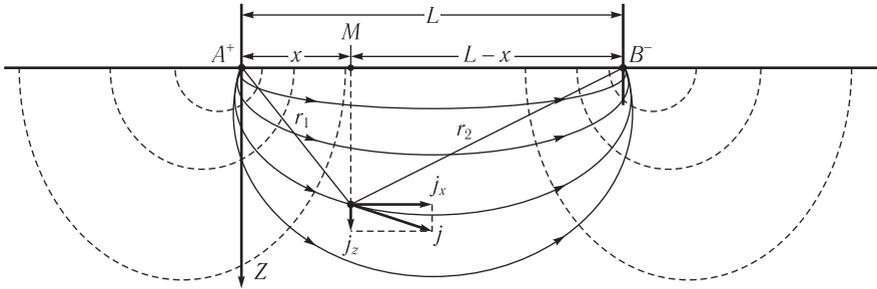


Рис. 1.9. К расчету плотности тока в однородной среде

Выберем прямоугольную систему координат с центром в точке A и определим изменение плотности тока с глубиной.

Суммарный вектор плотности тока в произвольно взятой точке M , удаленной от источников A и B соответственно на расстояния r_1 и r_2 , где $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, будет равен

$$\vec{j} = \vec{j}_x + \vec{j}_y + \vec{j}_z.$$

Воспользовавшись законом Ома, находим

$$j_x = \frac{1}{\rho} E_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial x}; \quad (1.46)$$

$$j_y = \frac{1}{\rho} E_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial y}; \quad (1.47)$$

$$j_z = \frac{1}{\rho} E_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (1.48)$$

Поскольку потенциал электрического поля в точке M , создаваемый двумя источниками, будет равен

$$\begin{aligned}
 U_M &= U_{MA} + U_{MB} = \\
 &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-x)^2 + y^2 + z^2}} \right), \quad (1.49)
 \end{aligned}$$

то, подставляя его выражение в уравнения (1.46)–(1.48), находим

$$j_x = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{L-x}{((L-x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right]; \quad (1.50)$$

$$j_y = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{y}{((L-x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right]; \quad (1.51)$$

$$j_z = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} - \frac{z}{((L-x)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right]. \quad (1.52)$$

Проанализируем с помощью полученных соотношений изменение плотности тока в среде.

Для начала рассмотрим характер и особенности изменения плотности тока с глубиной в одной из точек, например, в центре между источниками A и B ($x = L/2$, $y = 0$). Выражения (1.50)–(1.52) в этом случае упростятся и запишутся в виде:

$$j_x = \frac{I \cdot (L/2)}{\pi \left((L/2)^2 + z^2 \right)^{3/2}}; \quad (1.53)$$

$$j_y = 0;$$

$$j_z = 0.$$

То есть, величина суммарного вектора плотности тока в данном случае будет равна горизонтальной его составляющей $j = j_x$ (вектор плотности тока, всегда направленный по касательной к силовой линии, в точке

$r = x = L/2$ ориентирован вдоль оси OX). Наибольшее значение плотности тока, соответствующее минимальному удалению точки наблюдения от источников, будет на поверхности среды, т. е. при $z = 0$

$$j = j_0 = \frac{I}{\pi(L/2)^2}. \quad (1.54)$$

Для анализа возьмем относительную величину плотности тока как отношение плотности тока на глубине z (1.53) к ее максимальному значению (1.54)

$$j_{\text{отн}} = \frac{j}{j_0} = \frac{1}{(1 + 4z^2/L^2)^{3/2}}. \quad (1.55)$$

Из формулы (1.55) следует, что относительная плотность тока $j_{\text{отн}}$ при удалении точки наблюдения от источника на расстояние $r = L/2$ определяется двумя параметрами — глубиной z точки и расстоянием L между источниками поля A и B .

Семейство графиков зависимости $j_{\text{отн}}(z)$ для разных значений L , приведенное на рис. 1.10, *а*, показывает закономерное понижение относительной плотности тока с глубиной от единицы ($z = 0$) до значений, близких к нулю ($z \rightarrow \infty$). При этом величина и характер изменения графиков существенно зависят от L . Увеличение L заметно повышает относительную плотность тока в среде. Причем это повышение происходит неравномерно с глубиной, что наглядно отображается графиком производной относительной плотности тока по L (рис. 1.10, *б*), вычисленной по формуле

$$\frac{\partial j_{\text{отн}}}{\partial L} = \frac{12z^2}{L^3} \left(1 + \frac{4z^2}{L^2} \right)^{-5/2}. \quad (1.56)$$

Данный график показывает, что наибольшее увеличение $j_{\text{отн}}$ происходит в ограниченном интервале глубин $\Delta Z_{\text{эф}}$, определяемом длиной L . В качестве величины $\Delta Z_{\text{эф}}$ примем интервал между соседними точками максимального градиента графика. По мере увеличения L этот интервал относительного повышения плотности тока смещается на все большие глубины, «высвечивая» все более глубоко залегающие участки среды, что и определяет, по сути, *принцип электрического зондирования*.

Из данного графика мы также видим, что при относительно малых разностях питающей линии (на малых глубинах) интервал $\Delta Z_{\text{эф}}$ достаточно

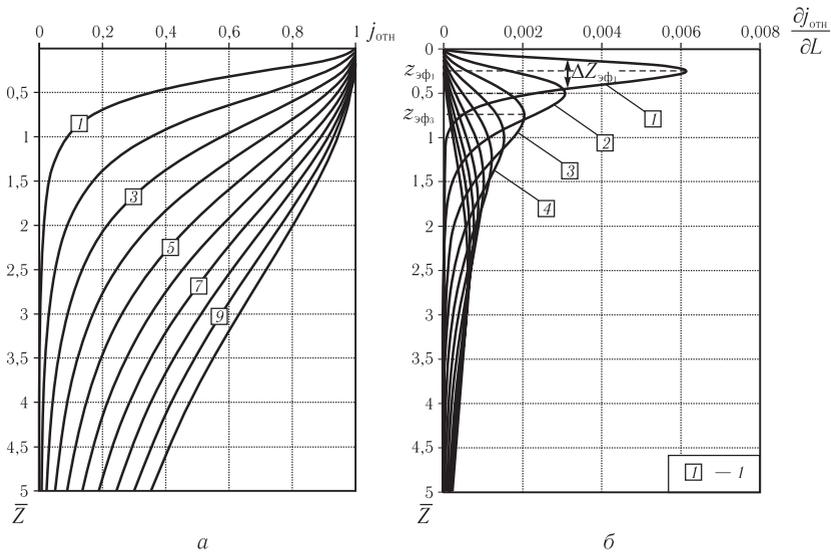


Рис. 1.10. Изменение относительной плотности тока $j_{\text{отн}}$ (а) и ее производной $\frac{\partial j_{\text{отн}}}{\partial L}$ (б) с глубиной в центре между источниками А и В. $\bar{Z} = Z/L_0$; L_0 — минимальное значение L .

$$l — \text{относительные значения разноса установки } \bar{L} = \frac{L}{L_0}$$

локализован, а по мере увеличения глубины он все более расширяется и сглаживается, понижая контрастность его проявления.

Учитывая особенности изменения относительной плотности тока с глубиной, можно ввести понятие эффективной глубины зондирования. В качестве *эффективной глубины зондирования* можно принять глубину, на которой происходит наибольшее относительное приращение плотности тока при изменении L . Из рис. 1.10, б следует, что эффективная глубина зондирования в однородной среде равна примерно одной четвертой разноса питающей линии установки L , либо половине действующего расстояния $r = L/2$, то есть $Z_{\text{эф}} \approx AB/4 = r/2$. Такое же соотношение получается, если в качестве меры эффективной глубины взять глубину, соответствующую максимальному градиенту изменения графика $j_{\text{отн}}(z)$ [Матвеев, 1990; Хмелевской, 1984 и др.]. Величина относительной плотности тока на этой глубине равна 0,72, то есть понижение ее относительно максимального значения составляет около 30 %.

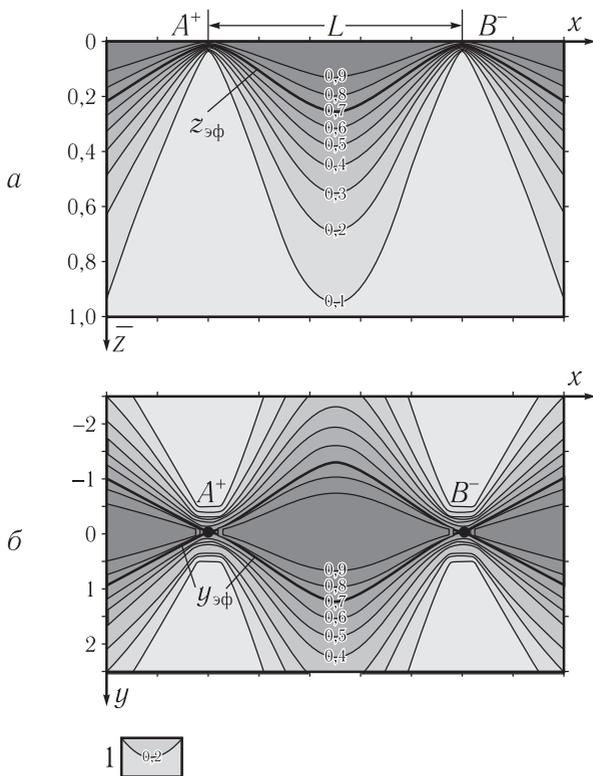


Рис. 1.11. Распределение относительной плотности тока в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях. $\bar{Z} = Z/L_0$.

l — значение относительной плотности тока

Следует отметить, что $Z_{эф}$ — несколько приближенное понятие. Величина ее определяется тем, что берется в качестве меры эффективной глубины распространения тока. Скажем, если в качестве $Z_{эф}$ взять нижнюю границу диапазона $\Delta Z_{эф}$, то связь $Z_{эф}$ с r выразится нелинейным соотношением $Z_{эф} \approx K(r) \cdot r$, где $K(r)$ будет постепенно увеличиваться с увеличением r примерно от 0,7 до значений, близких к единице. С глубиной четкость определения $Z_{эф}$ снижается ввиду выполаживания графиков $j(z)$ и увеличения интервала $\Delta Z_{эф}$ (при $L \rightarrow \infty$, $\Delta Z_{эф} \rightarrow 0$).

Как показывает практика, в случае относительно слабой контрастности пород по сопротивлению величина $Z_{эф} = 0,5r - 0,8r$ обеспечивает

необходимую глубинность зондирования. В неоднородных, в частности, слоистых средах при наличии контрастных по электрическому сопротивлению пород величина $Z_{\text{эф}}$ может меняться относительно r в достаточно широких пределах (порядка от $0,1r$ до значений, близких к r). Более эффективно глубина зондирования определяется в результате количественной интерпретации.

Мы проанализировали лишь частный вариант, когда точка наблюдения находится посередине между источниками A и B .

Рассмотрим пространственное изменение относительной плотности тока и эффективной глубины зондирования. Результаты расчета значений плотности тока с помощью формулы (1.50), отображенные в виде вертикального среза поля относительной плотности тока, проходящего через линию AB , показаны на рис. 1.11, a .

Характер поведения изолиний

$$j_{\text{отн}} = j_x(x, y = 0, z) / j_0(x, y = 0, z = 0),$$

отображающий изменение глубины проникновения электрического тока вдоль линии AB , показывает, что наибольшая глубина зондирования достигается в центре между двумя источниками, а при приближении точки наблюдения к одному из источников она уменьшается практически до нуля. В частности, эффективная глубина зондирования, соответствующая, как было показано выше, значению примерно $0,7$, меняется от $0,5r$ в центре установки до значений, близких к нулю вблизи источника. То есть эффективная глубина электрического зондирования определяется в основном расстоянием точки наблюдения до ближайшего источника.

Аналогичная картина получается и для распределения относительной плотности тока $j_{\text{отн}} = j_x(x, y, z = 0) / j_0(x, y = 0, z = 0)$ в горизонтальной плоскости (рис. 1.11, b).

1.4. Понятие кажущегося сопротивления, виды измерительных установок, принцип взаимности

До данного момента мы рассматривали особенности поведения электрического поля в однородной изотропной среде. Прежде чем перейти к изучению электрических полей в случае более сложных моделей сред, рассмотрим одно из важных в электроразведке понятий — кажущегося сопротивления, в виде которого представляются результаты наблюдений большинства электроразведочных методов.

Данная величина вводится с помощью следующей простой аналогии. В случае однородной изотропной среды ее удельное электрическое сопротивление, согласно формулам для поля точечного источника (1.26), (1.27), определяется соотношениями:

$$\rho = 2\pi \cdot r \frac{U(r, \rho = \text{const})}{I};$$

$$\rho = 2\pi \cdot r^2 \frac{E(r, \rho = \text{const})}{I},$$

где $U(r, \rho = \text{const})$; $E(r, \rho = \text{const})$ — значения потенциала и напряженности электрического поля, измеренные на поверхности однородной среды.

Если же применить эти формулы для определения электрического сопротивления в случае произвольной неоднородной среды, то результатом вычисления будет некое обобщенное электрическое сопротивление пород, залегающих в диапазоне эффективной глубины проникновения электрического тока. Эта величина получила название *кажущегося сопротивления* — ее обозначают $\rho_k(r)$. Формула для вычисления кажущегося сопротивления в случае поля, создаваемого одним источником, соответственно, определится соотношениями:

$$\rho_k(r) = 2\pi \cdot r \frac{U(r, \rho(x, y, z))}{I}; \quad (1.57)$$

$$\rho_k(r) = 2\pi \cdot r^2 \frac{E(r, \rho(x, y, z))}{I}, \quad (1.58)$$

где $U(r, \rho(x, y, z))$; $E(r, \rho(x, y, z))$ — значения потенциала и напряженности электрического поля, измеренные на поверхности неоднородной среды. Аналогичным образом получается выражения $\rho_k(r)$ для любой измерительной установки.

Несколько слов об измерительных установках. В методе сопротивлений используется достаточно много видов измерительных установок, представляющих различные комбинации взаимного расположения измерительных и питающих электродов [Матвеев, 1990; Хмелевской, 1984 и др.]. Отдельные из них приведены на рис. 1.12. Классической и наиболее широко используемой при выполнении электрических

а)		4-х электродная симметричная установка (установка Шлюмберже) $AMNB$: $MN < 1/3AB$; $AN = BM$; $r = AB/2$
б)		4-х электродная установка (установка Винера) $AMNB$: $AN = BM$; $MN < 1/3AB$
в)		3-х электродная градиентная установка AMN , $B \rightarrow \infty$: $MN < 1/3AB$; $BM \gg AN$
г)		2-х электродная потенциальная установка AM , $B \rightarrow \infty$, $N \rightarrow \infty$: $BM \gg AM$; $AN \gg AM$
д)		Дипольная радиальная установка $AMBN$: $AB < 0,2r$; $MN < 0,1r$; $-30^\circ < \theta < 30^\circ$
е)		Дипольная азимутальная установка $AMBN$: $AB < 0,6r$; $MN < 0,2r$; $70^\circ < \theta < 110^\circ$
ж)		Дивергентная установка $A^+A^-MNB^+B^-$

Рис. 1.12. Примеры измерительных установок

зондирований является установка Шлюмберже, состоящая из четырех симметрично расположенных относительно центра приемных (M , N) и питающих (A , B) электродов ($MN < AB/3$) (рис. 1.12, а). Для подчеркивания тех или иных особенностей разреза, повышения технологичности и производительности работ, применяют различные ее варианты — двух-, трех- и многоэлектродные установки (рис. 1.12, в, г, ж). При выполнении глубинных зондирований и при производстве работ со сложными по проходимости условиями (наличие болотистых участков, водоемов, сильно залесенной местности и т. п.) используют дипольные установки (рис. 1.12, д, е).

По аналогии с двухэлектродной установки AM рассмотрим несколько примеров, показывающих общий подход к получению формул $\rho_k(r)$, для различных видов установок:

1) для трехэлектродной (градиентной) установки

$$\Delta U = U_M + U_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{MN}{AM \cdot AN};$$

$$\rho_k(r) = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I}; \quad (1.59)$$

2) для четырехэлектродной симметричной установки (установки Шлюмберже) ($MA = NB$)

$$\Delta U = U_M + U_N = (U_{AM} + U_{BM}) - (U_{AN} + U_{BN}) =$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) = \frac{I\rho}{\pi} \frac{MN}{AM \cdot AN};$$

$$\rho_k(r) = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I}; \quad (1.60)$$

и др.

Если учесть, что в случае потенциальной установки $U_M = \Delta U = U_M - U_\infty$, то общее выражение для кажущегося сопротивления может быть записано в виде:

$$\rho_k(r) = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (1.61)$$

или

$$\rho_k(r) = K \cdot R, \quad (1.62)$$

где множитель K называют *коэффициентом установки*, а величина $R = \Delta U/I$ представляет электрическое сопротивление некоторой части разреза.

Такое, казалось бы, формальное введение понятия кажущегося сопротивления, на самом деле, как мы увидим ниже, дает весьма удобный инструмент для истолкования результатов электроразведочных наблюдений и имеет целый ряд важных особенностей, упрощающих данный процесс. Остановимся на некоторых из них.

Рассмотрим каждый из двух сомножителей, входящих в формулу (1.62). Первый из них (K), как следует из формул (1.57)–(1.60), зависит только от «геометрии» измерительной установки — расстояний между

питающими и измерительными ее электродами. Он никак не связан со свойствами среды. Обратим внимание, что в случае потенциальной установки, при использовании которой электрическое поле в однородной среде убывает обратно расстоянию ($U \sim 1/r$), коэффициент K пропорционален r ($K \sim r$), в случае градиентной установки ($E \approx \Delta U / \Delta r \sim 1/r^2$), $K \sim r^2$, для дипольной установки — соответственно ($E \approx \Delta U / \Delta r \sim 1/r^3$), $K \sim r^3$. То есть, коэффициент K в формуле для кажущегося сопротивления играет роль своеобразного нормирующего множителя, компенсирующего «геометрическую» составляющую наблюдаемого поля, связанную с убыванием поля по мере удаления точки наблюдения от источника.

При рассмотрении второго множителя в формуле (1.62) — некоторого сопротивления R — возникает вопрос, какой части разреза оно соответствует?

Попробуем уяснить это на примере однородной среды, при измерениях с трехэлектродной градиентной установкой (рис. 1.13). Поскольку ΔU есть разность потенциалов между двумя эквипотенциальными полусферическими поверхностями, проходящими соответственно через электроды M и N , а весь ток, стекающий с электрода A , пронизывает этот полусферический слой, то для определения R можно воспользоваться формулой вычисления сопротивления линейного проводника $R = \rho \cdot l / S$. В данном случае l — это толщина слоя, равная Δr , а S — его поперечное сечение — поверхность полусферы ($S = 2\pi \cdot r^2$). Учитывая изменение поперечного сечения такого проводника в зависимости от r , общее сопротивление такого слоя найдем путем интегрирования

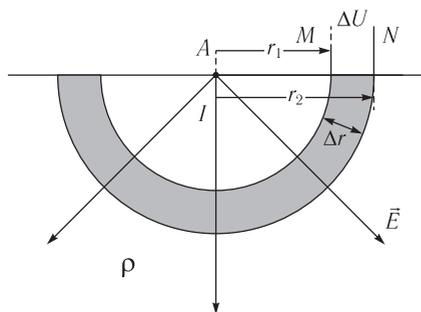


Рис. 1.13. К расчету сопротивления полусферического слоя

решениями соответственно через электроды M и N , а весь ток, стекающий с электрода A , пронизывает этот полусферический слой, то для определения R можно воспользоваться формулой вычисления сопротивления линейного проводника $R = \rho \cdot l / S$. В данном случае l — это толщина слоя, равная Δr , а S — его поперечное сечение — поверхность полусферы ($S = 2\pi \cdot r^2$). Учитывая изменение поперечного сечения такого проводника в зависимости от r , общее сопротивление такого слоя найдем путем интегрирования

$$R = \int_{r_1}^{r_2} dR = \rho \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{\Delta r}{r_1 r_2}. \quad (1.63)$$

Сравнивая данное выражение с величиной R , получаемой из формулы (1.59) для данной установки (при $\rho_k(r) = \rho$)

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN}, \quad (1.64)$$

находим, что величина R в случае однородной среды равна сопротивлению полусферического слоя, ограниченного двумя эквипотенциальными поверхностями, проходящими через приемные электроды M и N .

В случае неоднородной среды, как мы увидим ниже (1.68), в выражение для R добавится множитель, характеризующий изменение относительной плотности тока, связанное с влиянием неоднородностей среды. И тем не менее, величина R показывает, что на результаты измерений эффективное влияние оказывает не вся область полупространства, пронизываемого электрическим током, а некоторая его часть, определяемая положением и размером приемной линии MN . Меняя положение MN , мы тем самым как бы просматриваем отдельные фрагменты исследуемой области. При этом уменьшение MN повышает детальность съемки, а увеличение MN , вследствие охвата полусферическим слоем большего объема пород, понижает ее. В предельном случае ($MN \rightarrow \infty$), соответствующем потенциальной установке, где один из приемных электродов удален на достаточно большое расстояние ($N \rightarrow \infty$), величина суммарного сопротивления R будет стремиться к некоторому его значению

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{MN}{AM \cdot AN} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{MN}{AM(AM + MN)} = \frac{\rho}{2\pi \cdot AM \left(\frac{AM}{MN} + 1 \right)},$$

или, поскольку $MN \rightarrow \infty$,

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot AM}. \quad (1.65)$$

Формула для сопротивления полусферического слоя в этом случае запишется

$$R = \rho \int_{r_1}^{\infty} \frac{dr}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1}.$$

То есть, в случае однородной среды величина R , определяемая потенциальной установкой, соответствует сопротивлению объема пород от поверхности полусферы радиуса AM до бесконечности. При этом можно отметить, что поскольку с удалением от источника (при $r_1 \rightarrow \infty$ и $\Delta r \rightarrow 0$)

сопротивление элементарного полусферического слоя согласно (1.63) стремится к нулю, наибольшее влияние на величину суммарного сопротивления R будет оказывать часть пород, наиболее близко расположенных к полусфере радиуса AM . Выражение для R показывает также, что потенциальная установка, вследствие ее более высокой степени интегральности, менее чувствительна к малым неоднородностям среды, чем градиентная.

Остановимся далее на некоторых физических особенностях кажущегося сопротивления. Перепишем формулу (1.58) для кажущегося сопротивления в виде

$$\rho_k(r) = \frac{2\pi \cdot r^2}{I} \cdot E_{MN} = \frac{1}{j_0} E_{MN}, \quad (1.66)$$

где $j_0 = I/2\pi r^2$ — плотность тока в однородном полупространстве в точке, удаленной от источника на расстояние r , $E_{MN} \cong \Delta U/MN$ (при $MN \rightarrow 0$) — напряженность электрического поля вблизи MN .

Учитывая, что E_{MN} , согласно закону Ома, определяется соотношением

$$E_{MN} = \rho_{MN} \cdot j_{MN},$$

формула (1.66), запишется в виде

$$\rho_k(r) = \rho_{MN} \cdot \frac{j_{MN}}{j_0}. \quad (1.67)$$

Таким образом, кажущееся сопротивление при данном разное измерительной установки r прямо пропорционально удельному электрическому сопротивлению среды вблизи приемной линии MN и величине относительной плотности тока вблизи нее, определяемой влиянием электрических свойств среды в области эффективного проникновения тока.

Формула (1.67) во многом объясняет характер проявления того или иного вида неоднородностей на кривой зондирования. Так, наличие приповерхностных неоднородностей при изменении положения приемной линии должно приводить к смещению графика зондирования по оси сопротивлений на некоторую примерно постоянную величину, определяемую изменением ρ_{MN} , что подтверждается результатами численного моделирования, приведенного, в частности, в разделе 2.4. Приближение же эффективной глубины зондирования к неоднородности вызывает перераспределение тока в окружающем пространстве, отображаемое изменением плотности тока вблизи приемной линии. При этом повышение

плотности тока вблизи MN , а следовательно и повышение $\rho_k(r)$, указывает на приближение эффективной глубины зондирования к объекту повышенного сопротивления, экранирующего электрический ток, и наоборот, понижение j_{MN} свидетельствует о приближении к объекту относительно пониженного сопротивления, концентрирующего в себе электрический ток. Такая связь для горизонтально-слоистой модели среды на количественном уровне отображается уравнением (1.116).

Используя формулу (1.67), можно получить выражение для R в случае неоднородной среды. Выразив R из формулы (1.62) и подставив выражение для $\rho_k(r)$ из (1.67), находим

$$R = \frac{\rho_k(r)}{K} = \frac{\rho_{MN} \cdot j_{MN}}{K \cdot j_0} = R_{\text{однор}} \cdot \frac{j_{MN}}{j_0}, \quad (1.68)$$

где $R_{\text{однор}} = \rho_{MN}/K$ — сопротивление полусферического слоя с удельным сопротивлением ρ_{MN} , ограниченного полусферическими поверхностями, проходящими через точки M и N ; K — коэффициент установки.

То есть в общем случае величина R включает в себя некую фоновую часть, характеризующую сопротивление однородного полусферического слоя ρ_{MN} мощностью, равной длине MN , и аномальную часть, отображающую проявление неоднородностей среды на величину относительной плотности тока вблизи приемной линии. Очевидно, что чем ближе неоднородность к MN , тем интенсивнее ее влияние на величину R . Все это говорит о том, что точку записи — точку, к которой относится измеренное значение поля, при графическом отображении результатов измерения градиента потенциала, следует относить к центру приемной линии.

Таким образом, величина кажущегося сопротивления является достаточно информативной характеристикой среды. Но в отличие от удельного электрического сопротивления она зависит от вида установки и от распределения тока в среде, что может приводить к различным эффектам при анализе электрических полей в случае анизотропных и неоднородных сред (в частности, к рассмотренному в следующем параграфе «парадоксу анизотропии» и др.).

О принципе взаимности

Принцип взаимности является одним из важных теоретических выводов математической физики. Этот принцип справедлив для различных физических полей (электромагнитных, упругих и др.) [Тихонов, Самарский, 1977]. Применительно к электроразведке постоянным током данный

принцип может быть сформулирован следующим образом: разность потенциалов, измеренная любой установкой при фиксированном положении электродов, не изменится, если приемные электроды MN сделать питающими, а питающие AB — приёмными (рис. 1.14, а).

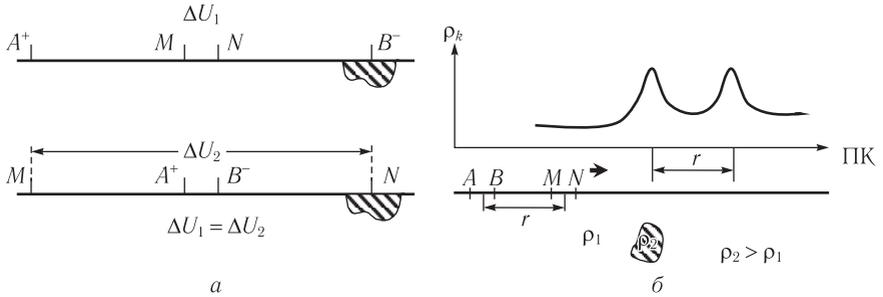


Рис. 1.14. К использованию принципа взаимности при интерпретации электроразведочных данных

Математическим выражением принципа взаимности является симметрия функции источника относительно своих аргументов, а в тензорном представлении — симметрия матрицы относительно ее диагонали.

Такая симметрия имеет место для линейных сред (где плотность тока и напряженность поля связаны между собой линейной зависимостью, то есть выполняется закон Ома), к которым относятся однородные и неоднородные изотропные среды:

$$\begin{Bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}$$

а также анизотропная среда:

$$\begin{Bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}$$

Нарушение принципа взаимности проявляется в нелинейных средах. Примером такой среды является плазма, для которой тензор имеет несимметричную структуру:

$$\begin{Bmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{Bmatrix} = -i \frac{Ne^2}{\omega\mu} \frac{1}{1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}} \begin{bmatrix} 1 & i\frac{\Omega}{\omega} & 0 \\ -i\frac{\Omega}{\omega} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}$$

Из принципа взаимности вытекает ряд моментов, которые могут быть использованы при контроле и истолковании результатов электро-разведочных наблюдений. Например, этот принцип может быть использован при контроле результатов полевых наблюдений и численного моделирования электрических полей, обосновании применимости некоторых методик наблюдений, точки записи и др. Не учет его может приводить в ряде случаев к неверным геологическим заключениям. Например, формальное использование для электропрофилирования дипольной осевой установки, при отнесении точки записи к центру приемного (либо питающего) диполя, может привести к появлению ложных аномалий (рис. 1.14, б).

Гипотетически нарушение принципа взаимности в нелинейных средах может быть использовано для поиска объектов, обладающих свойствами нелинейности, например, больших скоплений газа при повышенной его ионизации, соответствующей условиям плазменного состояния.

Оценочные расчеты указывают на возможную реальность такой ситуации. Так, поскольку условием существования плазмы является выполнение условия $L \gg r_D$, где L — средний линейный размер области, занимаемой газом, r_D — радиус Дебая, определяемый формулой [Сивухин, 1977]

$$r_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi \cdot n_e e^2}}, \quad (1.69)$$

где k — постоянная Больцмана ($k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); e — заряд электрона ($e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл); $T = 273$ К, то при линейном размере области, например, 10 м ($L = 10$ м) для выполнения соотношения $L = 10 r_D$, согласно (1.69) необходима ионизация газа (n_e) не менее 10^{16} ион \cdot м $^{-3}$. Для сравнения, в обычном состоянии почвенный воздух имеет ионизацию порядка $10^{12} - 10^{13}$ ион \cdot м $^{-3}$ [Богословский и др., 2000]. При дополнительных источниках излучения (например, при повышенной радиации) концентрация ионов может оказаться достаточной для состояния, соответствующего слабоионизированной плазме.

1.5. Поле точечного источника в однородной анизотропной среде

Анизотропной называют среду, свойства которой зависят от направления. Вследствие целого ряда факторов — тонкослоистости, неравномерности давлений и температур, особенностей структуры и текстуры пород и др., большинство геологических образований в той или иной мере обладают анизотропией электрических свойств. Наиболее ярко анизотропия проявляется, например, у некоторых осадочных пород (сланцы, мергели, соляные отложения и др.), представленных чередованием отличающихся по сопротивлению тонких пропластков.

Для уяснения вопросов, связанных с влиянием анизотропии на результаты электроразведочных наблюдений, рассмотрим задачу расчета электрического поля точечного источника на поверхности однородной анизотропной среды.

Итак, пусть на поверхности анизотропной однородной среды, представленной чередованием тонких пропластков различного сопротивления с углом падения α , находится точечный источник A , с которого стекает в землю ток силы I (рис. 1.15, a). Требуется определить основные характеристики электрического поля в произвольной точке M , отстоящей от источника на расстоянии r .

Выберем декартову систему координат, направив оси X и Y вдоль, а ось Z — в крест напластований.

Обозначим $\rho_x = \rho_y = \rho_l$ — продольное удельное электрическое сопротивление; $\rho_z = \rho_t$ — поперечное удельное электрическое сопротивление; $\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_t}$ — среднее квадратичное удельное сопротивление.

Введём понятие *коэффициента анизотропии* — λ , характеризующего степень различия свойств среды вдоль и вкрест напластований, $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}}$. Поскольку $\rho_t > \rho_l$, что следует из анализа формул для парал-

лельно и последовательно соединенных проводников, коэффициент λ для анизотропной среды всегда больше единицы.

Исходным для решения данной задачи является уравнение (1.17), полученное на основе уравнений Максвелла, которое в данном случае запишется в виде

$$\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_l} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_t} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1.70)$$

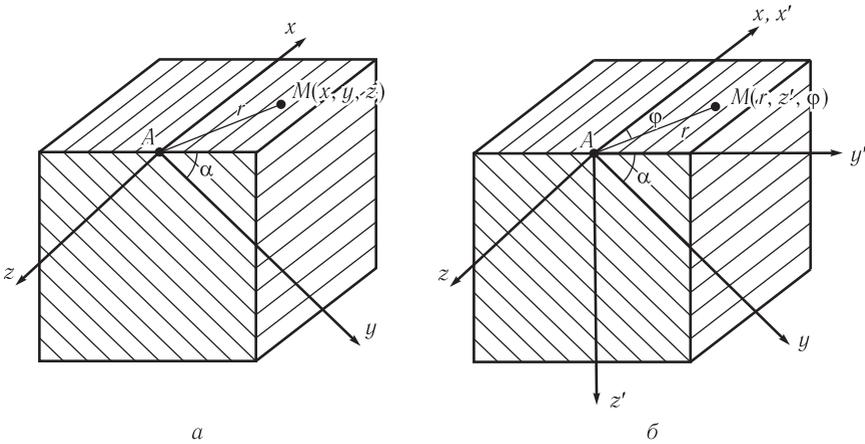


Рис. 1.15. К расчету электрического поля точечного источника в анизотропной среде

Известно несколько способов решения этого уравнения. Строгое математическое его решение приведено в работе А. И. Заборовского [1963]. Однако, учитывая свойство единственности, для упрощения его поиска наряду со строгими математическими способами в электродинамике часто используют искусственные приемы, позволяющие угадать решение, отвечающее исходному уравнению. Воспользуемся одним из них, основанном на использовании аналогии между потенциальным полем в изотропной и анизотропной средах [Матвеев, 1990].

Формулу для потенциала в случае однородной изотропной среды с сопротивлением ρ (1.27) можно представить в виде

$$U = \frac{I\rho}{2\pi \cdot r} = \frac{I\rho\sqrt{\rho}}{2\pi\sqrt{\rho}\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{I\sqrt{\rho \cdot \rho \cdot \rho}}{2\pi\sqrt{\rho x^2 + \rho y^2 + \rho z^2}}, \quad (1.71)$$

то есть искусственно вводим сопротивления для каждой из координат, формируя тем самым аналогию с анизотропной средой.

В случае анизотропной среды, где удельное сопротивление различно в зависимости от координат, на основе (1.71) приходим к уравнению

$$U = \frac{I\sqrt{\rho_x \cdot \rho_y \cdot \rho_z}}{2\pi\sqrt{\rho_x \cdot x^2 + \rho_y \cdot y^2 + \rho_z \cdot z^2}}; \quad (1.72)$$

Или, с учетом введенных выше обозначений,

$$U = \frac{I\rho_i \sqrt{\rho_i}}{2\pi\sqrt{\rho_i \cdot x^2 + \rho_i \cdot y^2 + \rho_i \cdot z^2}} = \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{x^2 + y^2 + \lambda^2 \cdot z^2}}. \quad (1.73)$$

Полученное решение, выражающее связь потенциала с параметрами анизотропной среды, отвечает уравнению (1.70), в чем можно убедиться, подставив в него (1.73).

Для удобства дальнейшего анализа повернём систему координат вокруг оси X на угол α с тем, чтобы плоскость XOY совпала с поверхностью анизотропной среды, а ось Z — с осью глубин (рис. 1.15, б).

Используя формулы поворота осей координат:

$$\begin{aligned} x &= x'; \\ y &= y' \cdot \cos\alpha + z' \cdot \sin\alpha; \\ z &= z' \cdot \cos\alpha - y' \cdot \sin\alpha. \end{aligned}$$

или в случае $z' = 0$ (наблюдения на поверхности среды)

$$\begin{aligned} x &= x'; \\ y &= y' \cdot \cos\alpha; \\ z &= -y' \cdot \sin\alpha, \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} U &= \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{x'^2 + y'^2 \cos^2\alpha + \lambda^2 y'^2 \sin^2\alpha}} = \\ &= \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{x'^2 + y'^2 - y'^2 \sin^2\alpha + \lambda^2 y'^2 \sin^2\alpha}} = \\ &= \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{x'^2 + y'^2 + y'^2 \sin^2\alpha(\lambda^2 - 1)}}. \end{aligned} \quad (1.74)$$

Перейдем к цилиндрической системе координат, позволяющей выразить значение потенциала непосредственно через расстояние от точки наблюдения до источника r :

$$x' = r \cdot \cos\varphi;$$

$$y' = r \cdot \sin \varphi.$$

Подставив эти соотношения в уравнение (1.74), находим

$$U = \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi + r^2 \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \alpha \cdot (\lambda^2 - 1)}}.$$

Выполнив небольшие преобразования, получаем окончательное выражение для потенциала на поверхности анизотропной среды

$$U = \frac{I\rho_m}{2\pi \cdot r \sqrt{1 + \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \alpha \cdot (\lambda^2 - 1)}}. \quad (1.75)$$

Соответственно

$$E = -\frac{dU}{dr} = \frac{I\rho_m}{2\pi \cdot r^2 \sqrt{1 + \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \alpha \cdot (\lambda^2 - 1)}}. \quad (1.76)$$

Используя полученные формулы (1.75), (1.76), можем найти выражение для кажущегося сопротивления для различных видов измерительных установок.

В случае двухэлектродной (потенциальной) установки

$$\rho_k = 2\pi r \frac{U}{I},$$

поэтому

$$\rho_k = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \alpha \cdot (\lambda^2 - 1)}}. \quad (1.77)$$

Вид данной формулы не изменится, если вместо потенциальной взять градиентную (трех- либо четырехэлектродную) установку, в чем можно легко убедиться, используя формулы (1.58) и (1.76).

Таким образом, кажущееся сопротивление на поверхности однородной анизотропной среды зависит не только от свойств среды, но и от азимута установки (φ) и угла наклона слоистых образований относительно земной поверхности (α).

Исследуем полученное выражение (1.77). Рассмотрим два предельных случая — горизонтальное и вертикальное напластование пород.

При горизонтальном напластовании ($\alpha = 0$) формула (1.77) показывает, что кажущееся сопротивление, измеренное на поверхности горизонтально-слоистой среды, не зависит от ориентации измерительной установки и при любых значениях ее азимута ($0 \leq \varphi \leq 180^\circ$) равно среднему квадратичному ее сопротивлению ($\rho_k(r) = \rho_m$).

При вертикальном расположении напластований ($\alpha = 90^\circ$) результат измерений будет определяться азимуту установки:

$$\text{при } \varphi = 0^\circ, \rho_k^{\parallel} = \rho_m;$$

$$\text{при } \varphi = 90^\circ, \rho_k^{\perp} = \rho_m / \lambda = \rho_l,$$

где ρ_k^{\parallel} и ρ_k^{\perp} — соответственно значения кажущегося сопротивления $\rho_k(r)$ при ориентации установки вдоль и в крест напластований.

В данном случае мы видим, казалось бы, некоторое противоречие — кажущееся сопротивление, полученное при ориентации установки вдоль напластований, превышает его значение при ориентации установки в крест напластованию (в λ раз). В то время как продольное удельное электрическое сопротивление всегда меньше поперечного удельного сопротивления (в λ^2 раз):

$$\rho_k^{\parallel} = \lambda \cdot \rho_k^{\perp};$$

$$\rho_l = \frac{1}{\lambda^2} \rho_t,$$

или, обозначив для наглядности $\rho_l = \rho''$, а $\rho_t = \rho^+$, запишем

$$\begin{aligned} \rho_k^{\parallel} &> \rho_k^{\perp}, \\ \rho'' &< \rho^+ \end{aligned} \quad (1.78)$$

Такая ситуация получила в электроразведке название «парадокса анизотропии». Однако не случайно данное выражение взято в кавычки, поскольку по сути никакого противоречия здесь нет, а все объясняется разной природой сравниваемых величин.

Для объяснения данного явления воспользуемся формулой (1.67), поясняющей физический смысл кажущегося сопротивления, которая при продольном и поперечном расположении измерительной установки на поверхности анизотропной среды запишется соответственно в виде

$$\rho_k^{\parallel} = \rho_l \frac{j_M^{\parallel}}{j_0};$$

$$\rho_k^{\perp} = \rho_t \frac{j_M^{\parallel}}{j_0}.$$

Взяв отношения правых и левых частей этих уравнений, найдем

$$\frac{\rho_k^{\parallel}}{\rho_k^{\perp}} = \frac{\rho_l}{\rho_t} \cdot \frac{j_M^{\parallel}}{j_M^{\perp}}, \quad (1.79)$$

где

$$j_M^{\parallel} = \frac{1}{\rho_l} \cdot \frac{\partial U^{\parallel}}{\partial x}, \quad (1.80)$$

$$j_M^{\perp} = -\frac{1}{\rho_t} \cdot \frac{\partial U^{\perp}}{\partial y}. \quad (1.81)$$

Потенциал электрического поля для данного случая ($\alpha = 90^\circ$) согласно (1.74) будет определяться формулой

$$U = \frac{I\rho_m}{2\pi\sqrt{x^2 + \lambda^2 y^2}}$$

При ориентации измерительной установки вдоль и в крест напластования (рис. 1.16, а) выражения для потенциала запишутся соответственно в виде

$$U^{\parallel} = U(x, y = 0) = \frac{I\rho_m}{2\pi x}; \quad \frac{\partial U^{\parallel}}{\partial x} = -\frac{I\rho_m}{2\pi x^2};$$

$$U^{\perp} = U(x = 0, y) = \frac{I\rho_m}{2\pi\lambda y}; \quad \frac{\partial U^{\perp}}{\partial y} = -\frac{I\rho_m}{2\pi\lambda y^2}.$$

Подставив эти выражения в формулы (1.80), (1.81) и взяв их отношение, находим

$$\frac{j_M^{\parallel}}{j_M^{\perp}} = \frac{\rho_t \cdot \lambda}{r_l} \cdot \frac{y^2}{x^2} = \lambda^3 \cdot \frac{y^2}{x^2}.$$

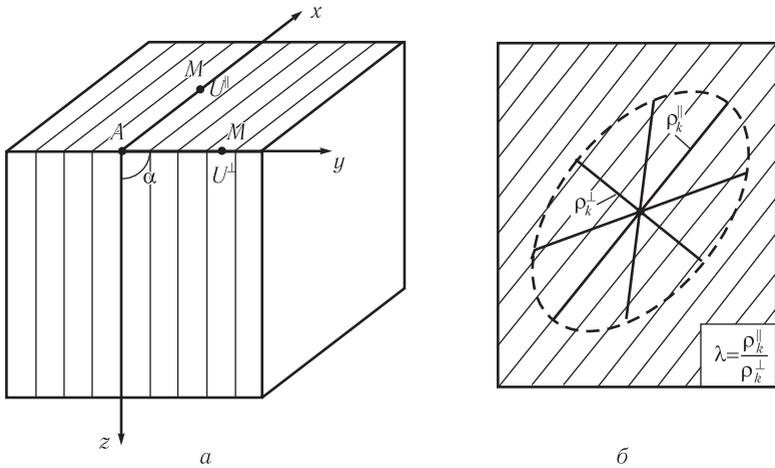


Рис. 1.16. К пояснению и практическому использованию «парадокса анизотропии»

Поскольку при расположении установки вдоль и в крест напластований точка наблюдения M находится на одинаковом удалении от источника ($x = y$), получаем

$$j_M^{\parallel} / j_M^{\perp} = \lambda^3. \quad (1.82)$$

То есть, в анизотропной среде плотность тока вдоль напластования в λ^3 раз больше, чем в крест напластования, в то время, как удельное электрическое сопротивление вдоль напластования в λ^2 раз меньше сопротивления пород вкрест напластования. Подставляя (1.82) в соотношение (1.79), имеем

$$\frac{\rho_k^{\parallel}}{\rho_k^{\perp}} = \frac{\rho_t}{\rho_t} \cdot \frac{j_M^{\parallel}}{j_M^{\perp}} = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \lambda^3 = \lambda.$$

Таким образом, мы видим, что «парадокс анизотропии» объясняется природой кажущегося сопротивления, которое, в отличие от удельного электрического сопротивления, зависит еще и от распределения плотности тока в среде. А поскольку плотность тока в анизотропной среде по величине изменяется более значительно (в λ^3 раз), чем удельное электрическое сопротивление (в λ^2 раз), это и приводит к мнимому противоречию между поведением кажущегося и удельного сопротивлений.

Полученные соотношения могут быть использованы на практике для определения некоторых элементов залегания и особенностей строения геологических образований — направления простираения зон трещиноватости, слоистости и др., а в отдельных случаях — и углов их падения [Заборовский, 1963]. К примеру, определение направления простираения и коэффициента анизотропии в случае субвертикальной трещиноватости может быть сравнительно просто выполнено по результатам круговых (азимутальных) наблюдений. Длинная ось круговой диаграммы кажущегося сопротивления согласно «парадоксу анизотропии» укажет направление простираения трещиноватой зоны, а отношение длинной оси к короткой даст величину коэффициента анизотропии λ (рис. 1.16, б).

С помощью «парадокса анизотропии» можно показать, что при электрическом каротаже в условиях квазигоризонтального залегания тонкослоистых пород ($\alpha = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$) измеряемое значение кажущегося сопротивления соответствует продольному удельному сопротивлению слоистой толщи ρ_l .

Из особенностей поведения электрического поля в анизотропной среде можно отметить еще и тот факт, что в отличие от однородной изотропной среды, в данном случае наблюдается несовпадение направлений вектора напряженности и вектора плотности тока (то есть силовых и токовых линий). Действительно, поскольку

$$\vec{E} = \left\{ \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z} \right\},$$

$$\vec{j} = \left\{ \frac{1}{\rho_x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{1}{\rho_y} \cdot \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{1}{\rho_z} \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right\},$$

то, используя скалярное произведение этих векторов, находим:

$$\cos(\vec{E}, \vec{j}) =$$

$$= \frac{\frac{1}{\rho_x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\rho_y} \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{\rho_z} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \cdot \sqrt{\rho_x^2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \rho_y^2 \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + \rho_z^2 \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2}} \neq 1.$$

1.6. Поле точечного источника в горизонтально-слоистой среде

Горизонтально-слоистая модель является одной из наиболее широко используемых в геофизике. Это связано с тем, что она достаточно адекватно отображает геологический разрез в условиях осадочных образований и, как правило, обеспечивает достаточно строгий математический расчет физических полей. Примером этому служит расчет электрического поля точечного источника в горизонтально-слоистой среде, являющийся теоретической основой метода вертикального электрического зондирования.

К настоящему времени существует несколько способов решения данной задачи, включающих варианты расчета электрического поля как на поверхности слоистого полупространства (наземный вариант) [Заборовский, 1963; Матвеев, 1990; Хмелевской, 1984 и др.], так и во внутренних его точках (шахтный вариант) [Хмелевской и др., 1994; Sato, 2000].

Рассмотрим один из способов расчета электрического поля для наземного варианта электроразведочных наблюдений.

Пусть на поверхности горизонтально-слоистой среды с произвольным числом n слоев в точке A расположен точечный источник, с которого подается в землю ток силы I . Обозначим: h_i — мощность i -го слоя ($i = 1, n$); ρ_i — его удельное электрическое сопротивление; z_i —

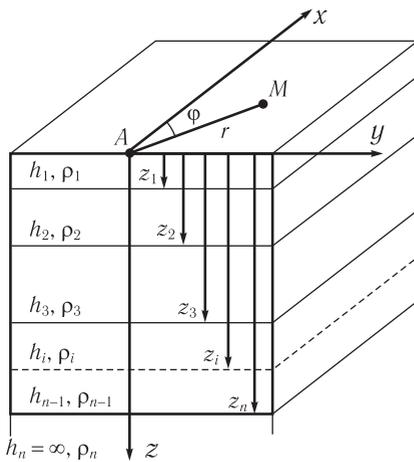


Рис. 1.17. Поле точечного источника в горизонтально-слоистой среде

глубина залегания подошвы i -го слоя (рис. 1.17). Сопротивление воздуха, заполняющего верхнее полупространство, полагаем равным бесконечно большому значению. Необходимо определить потенциал электрического поля в произвольной точке M на поверхности такой среды, удаленной на расстояние r от источника.

Учитывая осесимметричный характер создаваемого поля, выберем цилиндрическую систему координат с началом в точке A и осью z , направленной вниз перпендикулярно напластованиям.

Согласно основным положениям электродинамики, рассмотренным в разделе 1.1, потенциал поля в каждом слое должен удовлетворять уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0,$$

которое, учитывая симметрию поля относительно оси z , обуславливающую независимость его от φ ($U(\varphi) = \text{const}$), запишется в более простом виде

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1.83)$$

Для получения единственного решения, отвечающего заданной модели среды, воспользуемся граничными условиями (1.19), (1.20), которым должно удовлетворять электрическое поле на каждой из границ раздела сред (то есть при $z = z_i$):

$$U_i = U_{i+1}; \quad (1.84)$$

$$\frac{1}{\rho_i} \frac{\partial U_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial U_{i+1}}{\partial z}. \quad (1.85)$$

Поскольку сопротивление воздуха бесконечно велико, для границы раздела земля-воздух граничное условие (1.85) запишется в виде

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \text{или} \quad \frac{\partial U_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (1.86)$$

С физической точки зрения равенство нулю вертикальной составляющей плотности тока в данном случае указывает на отсутствие перетекания тока из первого слоя в верхнее полупространство.

Кроме граничных условий необходимо учесть и некоторые общие сведения об особенностях поведения потенциала электрического поля, в частности, согласно (1.27), потенциал вне источника имеет конечное значение и стремится к нулю по мере удаления точки наблюдения от источника, т. е. $U_i(r) \rightarrow 0$ при $r \rightarrow \infty$.

Для решения задачи воспользуемся методом разделения переменных (методом Фурье) [Тихонов, Самарский, 1977], в соответствии с которым представим значение потенциала, зависящее от двух переменных $U = U(r, z)$ в виде произведения вспомогательных функций $V = V(r)$ и $W = W(z)$, каждая из которых зависит только от одной переменной:

$$U(r, z) = V(r) \cdot W(z). \quad (1.87)$$

Выполнив соответствующую замену в формуле (1), запишем

$$W \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{W}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + V \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = 0.$$

Разделив полученное выражение на WV , получим уравнение

$$\frac{1}{V} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{Vr} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{W} \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = 0, \quad (1.88)$$

первые два слагаемых которого зависят только от r , а третье — от z .

Данное уравнение можно представить в виде двух отдельных уравнений, приравняв слагаемые, зависящие от r некоторой величине m^2 , а слагаемое, зависящее от z , этой же величине, взятой с обратным знаком $-m^2$ ($0 \leq m \leq \infty$):

$$\frac{1}{V} \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{Vr} \frac{\partial V}{\partial r} = m^2;$$

$$\frac{1}{W} \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} = -m^2,$$

или, после небольших преобразований,

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{rV} \frac{\partial V}{\partial r} - m^2 V = 0, \quad (1.89)$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + m^2 W = 0. \quad (1.90)$$

Первое из этих уравнений является уравнением Бесселя, а второе — уравнением Гельмгольца.

Общий вид решений этих уравнений выражается следующими соотношениями [Тихонов, Самарский, 1977]:

$$V(r) = c_1 J_0(mr) + c_2 N_0(mr), \quad (1.91)$$

$$W(z) = c_3 e^{-mz} + c_4 e^{mz}, \quad (1.92)$$

где $J_0(mr)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $N(mr)$ — функция Неймана; C_1, C_2, C_3, C_4 — неизвестные коэффициенты.

Подставив полученные выражения (1.91), (1.92) в уравнение (1.87), получаем

$$U(r, z) = V(r) \cdot W(z) = (c_1 c_3 e^{-mz} + c_1 c_4 e^{mz}) J_0(mr) + (c_2 c_3 e^{-mz} + c_2 c_4 e^{mz}) N_0(mr).$$

Поскольку функция Неймана имеет особенность при значениях аргумента mr , стремящегося к нулю (рис. 1.18), что не отвечает условию о конечности потенциала, второе слагаемое можно исключить из общего решения, и выражение для искомого потенциала запишется в виде

$$U = (Ae^{-mz} + Be^{mz}) J_0(mr),$$

где $A = c_1 c_3$ и $B = c_1 c_4$.

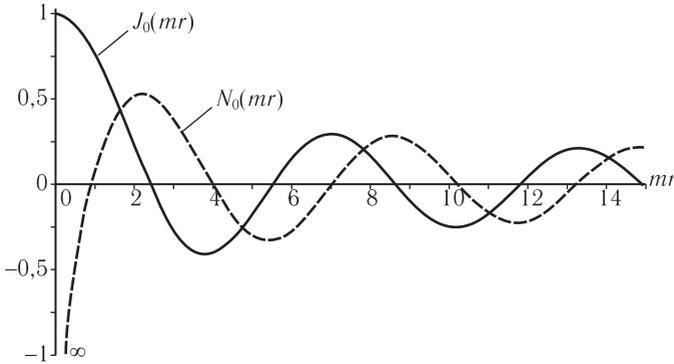


Рис. 1.18. Функции Бесселя $J_0(mr)$ и Неймана $N_0(mr)$ нулевого порядка

Общее выражение для потенциал любого i -го слоя находится путем интегрирования правой части последнего уравнения по всему интервалу возможных значений m :

$$U_i = \int_0^{\infty} (A_i e^{-mz} + B_i e^{mz}) J_0(mr) dm, \quad (1.93)$$

где A_i, B_i — неизвестные коэффициенты, зависящие от параметров среды; m — переменная интегрирования ($m = 1/r$).

Для определения коэффициентов A_i, B_i воспользуемся граничными условиями (1.84), (1.85), которые применительно к выражению (1.93) при $z = z_i$ приводят к следующим соотношениям:

$$A_i e^{-mz_i} + B_i e^{mz_i} = A_{i+1} e^{-mz_i} + B_{i+1} e^{mz_i}, \quad (1.94)$$

$$\frac{1}{\rho_i} (-A_i e^{-mz_i} + B_i e^{mz_i}) = \frac{1}{\rho_{i+1}} (-A_{i+1} e^{-mz_i} + B_{i+1} e^{mz_i}) \quad (1.95)$$

Разделив первое из них на второе, получим

$$\frac{A_i e^{-mz_i} + B_i e^{mz_i}}{A_i e^{-mz_i} - B_i e^{mz_i}} = \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \frac{A_{i+1} e^{-mz_i} + B_{i+1} e^{mz_i}}{A_{i+1} e^{-mz_i} - B_{i+1} e^{mz_i}}. \quad (1.96)$$

Для дальнейшего вывода воспользуемся тождеством Н. В. Липской, которое, в нашем случае, будет иметь вид

$$\frac{A_i e^{-m(z_i - h_i)} + B_i e^{m(z_i - h_i)}}{A_i e^{-m(z_i - h_i)} - B_i e^{m(z_i - h_i)}} = \operatorname{th} \left(mh_i + \operatorname{Arth} \frac{A_i e^{-mz_i} + B_i e^{mz_i}}{A_i e^{-mz_i} - B_i e^{mz_i}} \right). \quad (1.97)$$

Полученное соотношение связывает выражение некоторой функции для кровли i -го и $(i + 1)$ -го слоев (рис. 1.19).

Применив его к уравнению (1.96), находим

$$\frac{A_i e^{-m(z_i - h_i)} + B_i e^{m(z_i - h_i)}}{A_i e^{-m(z_i - h_i)} - B_i e^{m(z_i - h_i)}} = \operatorname{th} \left(mh_i + \operatorname{Arth} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \frac{A_{i+1} e^{-mz_i} + B_{i+1} e^{mz_i}}{A_{i+1} e^{-mz_i} - B_{i+1} e^{mz_i}} \right). \quad (1.98)$$

Учитывая одинаковую структуру выражений, входящих в состав левой и правой частей, обозначим

$$R_i(m) = \frac{A_i e^{-m(z_i - h_i)} + B_i e^{m(z_i - h_i)}}{A_i e^{-m(z_i - h_i)} - B_i e^{m(z_i - h_i)}}. \quad (1.99)$$

В результате этого уравнение (1.98) переписется в более компактном виде

$$R_i(m) = \text{th} \left(mh_i + \text{Arth} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R_{i+1}(m) \right). \quad (1.100)$$

Для границы раздела земля — воздух ($i = 1$) в случае n -слойного разреза согласно (1.100) будем иметь

$$R_1(m) = \text{th} \left(m_1 h_1 + \text{Arth} \frac{\rho_2}{\rho_1} R_2(m) \right), \quad (1.101)$$

где $R_2(m) = \text{th} \left(m_2 h_2 + \text{Arth} \frac{\rho_3}{\rho_2} R_3(m) \right),$

$$R_3(m) = \text{th} \left(m_3 h_3 + \text{Arth} \frac{\rho_4}{\rho_3} R_4(m) \right),$$

$$R_i(m) = \text{th} \left(mh_i + \text{Arth} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R_{i+1}(m) \right),$$

$$R_n(m) = 1.$$

В соответствии с областью существования гиперболических функций в формулах для $R_i(m)$ (формулы 1.100 и 1.101) при значениях аргумента меньших единицы берутся th , а при больших единицы — cth . То есть $R_i(m)$ является функцией, содержащей информацию о параметрах горизонтально-слоистой среды, начиная с кровли i -го слоя. Равенство единице этой функции для кровли подстилающего слоя ($R_n(m) = 1$), мощность которого полагается бесконечно большой, вытекает из асимптотического поведения гиперболических функций:

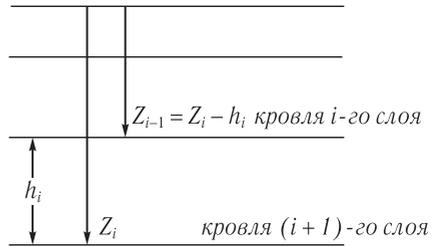


Рис. 1.19. Пояснение к выводу формулы для $R_i(m)$

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \text{th} x &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \right) = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1 - e^{-2x}}{e^x + e^{-2x}} \right) = 1 \end{aligned}$$

Учитывая рекуррентный характер формулы (1.101), функция $R_i(m)$ может быть пересчитана на кровлю любого заданного слоя.

Формула (1.101) записана для значений аргумента обратной гиперболической функции, меньшего единицы. Если аргумент больше единицы, то (в соответствии с областью существования этих функций (см. раздел 1.7)) вместо Arth и th следует брать соответственно Arcth и cth .

Для удобства расчетов формулу (1.100) обычно выражают через показательные функции [Матвеев, 1974]:

$$R_i(m) = \frac{1 - \psi_{i+1}(m)}{1 + \psi_{i+1}(m)}, \quad (1.102)$$

где

$$\psi_{i+1}(m) = \frac{1 - \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R_{i+1}(m)}{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R_{i+1}(m)} e^{-2mh_i}.$$

Таким образом, используя граничные условия, мы получили некоторую достаточно компактную и удобную для анализа функцию $R_i(m)$, сравнительно просто связанную с параметрами слоистой модели среды.

Попытаемся увязать эту функцию с полученным ранее выражением для потенциала (1.93), используя их общую связь с коэффициентами A_i, B_i .

Для кровли первого слоя, согласно (1.99),

$$R_1(m) = \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1}. \quad (1.103)$$

В то же время выражение для потенциала (1.93) для этого случая имеет вид:

$$U_1 = \int_0^{\infty} (A_1 + B_1) J_0(mr) dm. \quad (1.104)$$

После небольших преобразований последнего выражения и подстановки в него (1.103) получаем

$$\begin{aligned} U_1 &= (A_1 - B_1) \int_0^{\infty} \frac{A_1 + B_1}{A_1 - B_1} J_0(mr) dm = \\ &= (A_1 - B_1) \int_0^{\infty} R_1(m) J_0(mr) dm. \end{aligned} \quad (1.105)$$

Для определения неизвестной разности коэффициентов $(A_1 - B_1)$ воспользуемся граничным условием для границы раздела земля — воздух (1.86). Представим потенциал в первом слое в виде суммы потенциала для однородной среды с сопротивлением ρ_1 и некоторого добавочного потенциала, обусловленного влиянием всех последующих слоев

$$U_1(r, z) = U_0 + U_1' = \frac{I\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2 + z^2}} + \int_0^\infty (\bar{A}_1 e^{-mz} + B_1 e^{mz}) J_0(mr) dm, \quad (1.106)$$

С учетом преобразования Вебера — Липшица

$$\int_0^\infty e^{-mz} J_0(mr) dm = \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}}, \quad (1.107)$$

соотношение (1.106) при $z = 0$ запишется в виде

$$U_1(r, 0) = \int_0^\infty (q + \bar{A}_1 + B_1) J_0(mr) dm,$$

где

$$q = \frac{I\rho_1}{2\pi}. \quad (1.108)$$

Согласно (1.93)

$$q + \bar{A}_1 = A_1. \quad (1.109)$$

Используя граничное условие (1.86), получаем

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=0} = -\frac{q \cdot z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} + \int_0^\infty (-\bar{A}_1 \bar{e}^{-mz_1} + B_1 e^{mz_1}) m J_0(mr) dm = -\bar{A}_1 + B_1 = 0.$$

или

$$\bar{A}_1 = B_1$$

Выполнив замену в (1.109) и учитывая (1.108), находим

$$A_1 - B_1 = q = \frac{I\rho_1}{2\pi}.$$

Таким образом, подставив последнее соотношений в формулу (1.105), получаем окончательное выражение для потенциала на поверхности горизонтально-слоистой среды:

$$U = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} R_1(m) J_0(mr) dm. \quad (1.110)$$

Формула для напряженности электрического поля соответственно будет иметь вид

$$E = -\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm, \quad (1.111)$$

где $J_1(mr)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка, получаемая в результате дифференцирования функции $J_0(mr)$ по m

$$\frac{\partial J_0(mr)}{\partial m} = -m J_1(mr). \quad (1.112)$$

С помощью формул (1.110), (1.111) можно определить выражение кажущегося сопротивления для различных видов измерительных установок. Так, в случае двухэлектродной (потенциальной) установки AM

$$\rho_k(r) = 2\pi \cdot r \frac{U}{I} = r\rho_1 \int_0^{\infty} R_1(m) J_0(mr) dm.$$

В случае трехэлектродной градиентной установки AMN

$$\rho_k(r) = 2\pi \cdot r^2 \frac{E}{I} = r^2 \rho_1 \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm.$$

В случае четырехэлектродной градиентной установки Шлюмберже $AMNB$, электрическое поле, измеряемое с ее помощью, можно рассматривать как сумму полей, создаваемых двумя трехэлектродными установками ($\vec{E} = \vec{E}_{AMN} + \vec{E}_{BMN} = 2\vec{E}_{AMN}$, $q_{AB} = 2q_A$)

$$\rho_k(r) = \pi \cdot r^2 \frac{E}{I} = r^2 \rho_1 \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm.$$

Таким образом, в случае двухэлектродной (потенциальной) установки относительная величина кажущегося сопротивления определяется формулой

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r \int_0^{\infty} R_1(m) J_0(mr) dm, \quad (1.113)$$

а в случае градиентной трех-, либо четырехэлектродной установки

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm. \quad (1.114)$$

Расчет функции кажущегося сопротивления на поверхности горизонтально-слоистой среды по формулам (1.113), (1.114) сводится к выполнению двух операций — расчету функции $R_1(m)$ по заданным параметрам слоев в нужном интервале аргумента m , и вычислению интеграла, входящего в эти формулы. Расчет функции $R_1(m)$ сравнительно просто выполняется с помощью рекуррентных формул (1.101), (1.102), а для вычисления интеграла, как показала практика, наиболее эффективным оказалось преобразование его к интегралу типа свертки (Страхов, 1969; Ghosh, 1971 и др.). Получаемая в результате этого расчетная формула имеет следующий сравнительно простой вид

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = \sum_{j=-a}^{j=+b} C_j \cdot R_1(m_{i+j}), \quad (1.115)$$

где C_i — набор коэффициентов (коэффициенты фильтра), определяемый обычно методом наименьших квадратов [Куфуд, 1984]. Известно несколько наборов таких коэффициентов, полученных для разного шага дискретизации функции $R_1(m)$ [Ghosh, 1971; Куфуд, 1984; Абрамова, 1985 и др.]. Наибольшее применение в отечественных программах получили коэффициенты, полученные Е. Ш. Абрамовой для шага дискретизации $p = m_i/m_{i+1} = (10)^{1/7}$, что соответствует семи точкам на модуль логарифмического бланка. Значения коэффициентов приведены в табл. 1.1.

Следует отметить, что поскольку функция $R_1(m)$ может быть вычислена с заданным шагом относительно произвольно заданного начального аргумента $m = 1/r$, каждый из наборов коэффициентов (при соответствующем построении алгоритма) может быть использован для получения функции $\rho_k(r)$ для произвольного набора значений разноса r .

Таблица 1.1

Коэффициенты фильтра для расчета $\rho_k(r)$
(фильтр Абрамовой, $m_j/m_{j+1} = (10)^{1/7}$)

н/п	j	C_j
1	-5	-0,01629
2	-4	0,203828
3	-3	-1,20259
4	-2	3,737868
5	-1	-5,24185
6	0	1,916952
7	1	-0,22481
8	2	1,582989
9	3	-0,16269
10	4	0,361952
11	5	0,026421
12	6	-0,03003
13	7	0,067688
14	8	-0,03007
15	9	0,01063

Пример расчета кривой зондирования $\rho_k(r)$ для четырехслойной модели среды приведен на рис. 1.20. Кривая $\rho_k(r)$ по характеру поведения отображает изменение электрических сопротивлений пород с глубиной. С физической точки зрения это объяснимо поведением плотности тока вблизи приемной линии. Действительно, воспользовавшись формулой (1.67), отображающей физическое содержание кажущегося сопротивления, можем записать

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = \frac{j_{MN}(r)}{j_0} = r^2 \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm. \quad (1.116)$$

То есть, изменение величины кажущегося сопротивления с увеличением r определяется перераспределением тока в исследуемой среде, вызываемым наличием слоев разной проводимости: в случае приближения

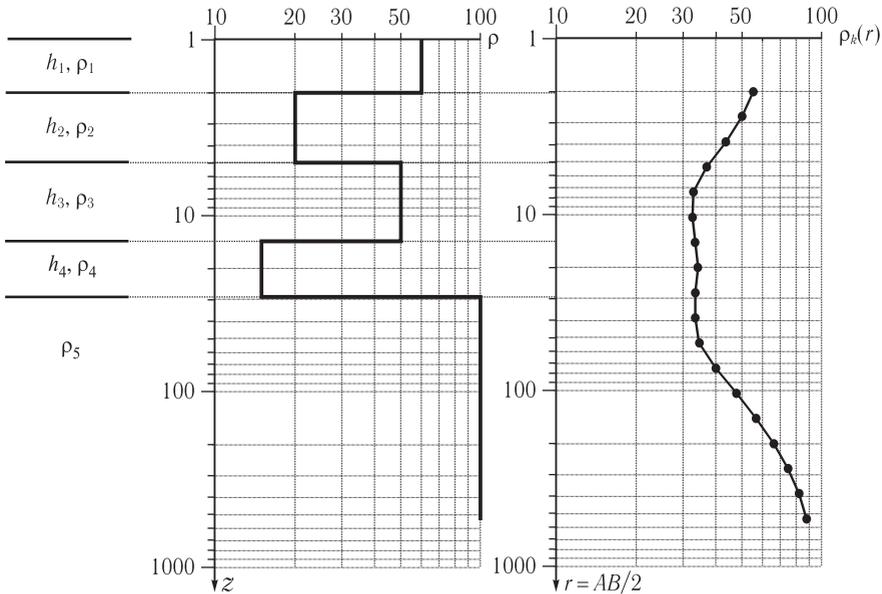


Рис. 1.20. График электрического зондирования $\rho_a(r)$ для пятислойной модели среды

эффективной глубины зондирования к слою относительно пониженного сопротивления, ток, устремляясь к нему, понижает плотность тока вблизи MN , а при приближении к слою относительно повышенного сопротивления, вследствие экранирующего эффекта, относительная плотность тока вблизи MN , а следовательно, и величина кажущегося сопротивления, повышаются.

В заключение данного раздела остановимся на свойствах функции $R_1(m)$, играющей важную роль в решении ряда прямых и, как увидим позднее, и обратных задач. Эти свойства достаточно полно изучены в работах В. Н. Страхова [1966, 1968, 1969], Б. К. Матвеева [1970, 1974], В. А. Филатова [1976] и др. Отметим основные из них.

1. Функция $R_1(m)$ положительна и ограничена на всем интервале положительных значений m , т. е. $0 \leq R_1(m) \leq \infty$ при $0 \leq m \leq \infty$.

2. Функция $R_1(m)$, так же как и функция кажущегося сопротивления, но в более сглаженной форме, качественно отображает изменение электрических параметров разреза с глубиной (рис. 1.21). При относительно больших значениях m она определяется параметрами верхних слоев, при уменьшении m она отображает строение промежуточной части разреза,

а при сравнительно малых m зависит главным образом от обобщенных параметров слоистой толщи S или T и от среднего удельного сопротивления опорного слоя ρ_n :

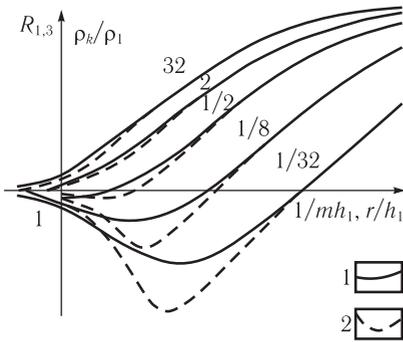
при $m \rightarrow 0$:

$$\rho_1 R_1(m) \approx \begin{cases} \rho_n, & ((0 < \rho_n < \infty)), \\ 1/(mS + 1/\rho_n), & (\rho_{n-1} < \rho_n < \infty), \\ mT + \rho_n, & (\rho_{n-1} > \rho_n > 0), \\ 1/mS, & (\rho_n = \infty), \\ mT, & (\rho_n = 0). \end{cases}$$

при $m \rightarrow \infty$, $\rho_1 R_1(m) = \rho_1$.

3. Функция $R_1(m)$ обладает свойством симметрии относительно оси абсцисс

$$R_1(m) = 1/R_1'(m),$$



где $R_1(m)$ и $R_1'(m)$ — соответственно функции для разрезов с удельными сопротивлениями $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ и их обратными значениями $1/\rho_1, 1/\rho_2, \dots, 1/\rho_n$.

Из свойства симметрии непосредственно вытекает, во-первых, одинаковая разрешающая способность графиков $R_1(m)$ по отношению к ρ_i и $1/\rho_i$, во-вторых, равенство пределов эквивалентности для кривых типов H и K , A и Q , и, в-третьих, одинаковые приемы интерпретации для выделения высокоомных и низкоомных горизонтов, что дает определенные преимущества интерпретации графиков $R_1(m)$ по сравнению с анализом графиков кажущегося сопротивления.

Рис. 1.21. Графики функций $R(m)$ (1) и кажущегося сопротивления (2) для трехслойных разрезов (по Б. К. Матвееву). Шифр кривых μ_2

Рекуррентный характер формул позволяет вычислять как $R_i(m)$ по $R_{i+1}(m)$ с помощью соотношений (1.100), (1.102), так и наоборот, $R_{i+1}(m)$ по функции $R_i(m)$ соответственно по формулам:

$$R_{i+1}(m) = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \operatorname{th}(-mh_i + \operatorname{Arth} R_i(m)). \quad (1.117)$$

либо

$$R_{i+1}(m) = \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} \frac{\Psi_i - 1}{\Psi_i + 1}, \quad (1.118)$$

где

$$\Psi_{i1}(m) = \frac{1 + R_i(m)}{1 - R_i(m)} e^{-2mh_i}.$$

1.7. Асимптоты кривых зондирования и связь асимптотических значений с обобщенными параметрами среды

Асимптотическое поведение кривых зондирования, непосредственно связанное с электрическими свойствами определенной части исследуемой среды, и количественные значения асимптот являются весьма полезными при интерпретации электроразведочных материалов.

Рассмотрим асимптоты кривой зондирования $\rho_k(r)$ для горизонтально-слоистой модели среды, то есть найдем значения прямых $\rho_k(r) = \operatorname{const}$, к которым стремится эта функция при неограниченном увеличении или уменьшении ее аргумента.

Для начала возьмем простейший случай — двухслойную среду при $\rho_2 < \rho_1$. Функция кажущегося сопротивления для нее согласно (1.114) и (1.101) запишется в виде

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \int_0^\infty R_1(m) J_1(mr) m dm, \quad (1.119)$$

где

$$R_1(m) = \operatorname{th} \left(mh_1 + \operatorname{Arth} \frac{\rho_2}{\rho_1} \right),$$

$$(h_2 = \infty, R_2(m) = 1).$$

Рассмотрим левую асимптоту, соответствующую случаю, когда разнос установки стремится к нулю ($r \rightarrow 0$ или $m = (1/r) \rightarrow \infty$). Поскольку $\operatorname{th}(\infty) = 1$, то $R_1(m) = 1$ и формула (1.119) запишется в виде

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \int_0^\infty J_1(mr) m dm, \quad (1.120)$$

Согласно преобразованию Вебера — Липшица (1.107) на поверхности наблюдения ($z = 0$)

$$\int_0^\infty J_0(mr) dm = \frac{1}{r} \quad (1.121)$$

и, соответственно,

$$\int_0^\infty J_1(mr) m dm = -\frac{\partial}{\partial r} \int_0^\infty J_0(mr) dm = \frac{1}{r^2}. \quad (1.122)$$

Подставляя это в формулу (1.120), получаем

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = 1, \quad \text{или} \quad \rho_k(r) = \rho_1.$$

То есть, при $r \rightarrow 0$ функция $\rho_k(r)$ стремится к сопротивлению первого слоя ($r \rightarrow 0, \rho_k(r) \rightarrow \rho_1$).

Рассмотрим правую асимптоту, соответствующую $r \rightarrow \infty$ ($m = (1/r) \rightarrow 0$). В этом случае получаем

$$R_1(m) = \text{th} \left(\text{Arth} \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) = \frac{\rho_2}{\rho_1};$$

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \int_0^\infty J_1(mr) m dm = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

отсюда

$$\rho_k(r) = \rho_2.$$

Следовательно, при $r \rightarrow \infty$ функция $\rho_k(r)$ стремится к сопротивлению второго слоя ($\rho_k(r) = \rho_2$).

Аналогично можно получить асимптоты и для кривых зондирования, соответствующих произвольному числу слоев.

Так, в случае трехслойной среды для левой асимптоты ($r \rightarrow 0, m \rightarrow \infty, R_1(m) = 1$), согласно формуле (1.119), получаем $\rho_k(r) = \rho_1$.

Для правой асимптоты ($r \rightarrow \infty, m \rightarrow 0$),

$$R_1(m) = \operatorname{th} \left(0 + \operatorname{arth} \frac{\rho_2 \rho_3}{\rho_1 \rho_2} \operatorname{th} \left(0 + \operatorname{Arth} \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \right) = \operatorname{th} \left(\operatorname{Arth} \frac{\rho_2 \rho_3}{\rho_1 \rho_2} \right) = \frac{\rho_3}{\rho_1}.$$

Подставляя это в (1.119), с учетом (1.121) находим

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \frac{\rho_3}{\rho_1} \int J_1(mr) m dm = \frac{\rho_3}{\rho_1}.$$

То есть, при $r \rightarrow \infty$, $\rho_k(r) = \rho_3$.

Таким образом, обобщая полученные результаты, можно отметить, что левая асимптота кривой кажущегося сопротивления равна значению удельного сопротивления первого слоя ($r \rightarrow 0$, $\rho_k(r) \rightarrow \rho_1$), а правая — значению удельного электрического сопротивления последнего слоя ($r \rightarrow \infty$, $\rho_k(r) \rightarrow \rho_n$).

Обобщённые параметры горизонтально-слоистой среды

При изучении реальных сред, представленных обычно достаточно большим числом слоев и тонких пропластков, при интерпретации электроразведочных материалов часто пользуются обобщенными характеристиками слоистых толщ: суммарной мощностью H , суммарной продольной проводимостью S , суммарным поперечным сопротивлением T , а также средним продольным ρ_l , средним поперечным ρ_r , средним квадратичным ρ_m удельным электрическим сопротивлением, коэффициентом анизотропии λ . Рассмотрим получение этих характеристик в случае n -слойного разреза с параметрами h_i , ρ_i , $i = 1, N$.

Выделим вертикальный столб пород с квадратным сечением 1×1 м · м и высотой $H = \sum_{i=1}^N h_i$ (рис. 1.22).

Рассмотрим два случая: 1) направление тока вдоль напластований, и 2) направление тока в крест напластований.

Первый вариант соответствует параллельному соединению проводников электрической цепи, при котором суммарное сопротивление R определяется соотношением:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad (1.123)$$

где R_i — сопротивление i -го линейного проводника, имеющего длину l_i , поперечное сечение S_i и удельное сопротивление ρ_i , определяемое формулой

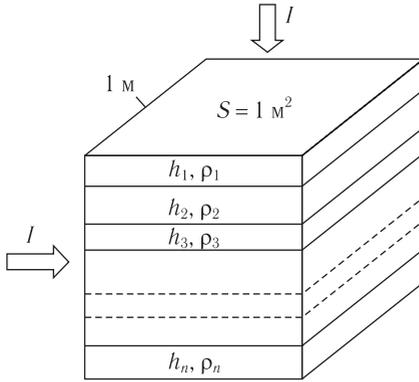


Рис. 1.22. К выводу обобщенных параметров горизонтально-слоистой среды

род будет определяться соотношением

$$S = \frac{1}{R} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = \sum_{i=1}^N S_i = \sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\rho_i}, \quad (1.126)$$

где

$$S_i = h_i / \rho_i.$$

Для оценки удельного электрического сопротивления слоистой толщи вводится понятие *среднего продольного сопротивления* (ρ_l), вычисляемого по формуле:

$$\rho_l = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{\sum_{i=1}^N S_i} = \frac{H}{S}, \quad (1.127)$$

где

$$H = \sum_{i=1}^N h_i.$$

Рассмотрим второй вариант, когда ток течет в крест напластований. Слоистая пачка в этом случае будет соответствовать последовательному сопротивлению проводников одинакового поперечного сечения 1 м^2 , длиной h_i и удельным сопротивлением ρ_i . Сопротивление каждого слоя будет равно

$$R_i = \rho_i \frac{h_i}{1} = \rho_i h_i,$$

$$R = \rho l / S, \quad (1.124)$$

для слоистой модели среды запишется в виде

$$R_i = \rho_i / h_i. \quad (1.125)$$

При изучении разрезов с преобладающим протеканием тока вдоль напластований, удобнее пользоваться понятием продольной проводимости — величины, обратной сопротивлению: $S_i = 1/R_i$.

Согласно (1.123) и (1.125) величина *суммарной продольной проводимости* слоистой пачки пород

а общее сопротивление выделенной пачки пород определится соотношением

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n.$$

В электроразведке сопротивление слоистой пачки пород при преобладающем направлении тока в крест напластований принято обозначать буквой T ($T_i = R_i$).

Таким образом, суммарное поперечное сопротивление слоистой пачки пород будет определяться формулой:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots T_n = \sum_{i=1}^N T_i = \sum_{i=1}^N h_i \rho_i, \quad (1.128)$$

где
$$T_i = h_i \rho_i.$$

Среднее поперечное электрическое сопротивление такой пачки будет равно:

$$\rho_i = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N h_i} = \frac{T}{H}. \quad (1.129)$$

Используя формулы (1.127), (1.129), можем определить среднее квадратичное сопротивление ρ_m и коэффициент анизотропии λ слоистой пачки пород:

$$\rho_m = \sqrt{\rho_t \cdot \rho_l} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{\sum_{i=1}^N S_i}} = \sqrt{\frac{T}{S}}, \quad (1.130)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N h_i}} = \frac{1}{H} \sqrt{T \cdot S}, \quad (1.131)$$

или

$$\lambda \cdot H = \sqrt{T \cdot S}.$$

Заметим, что в случае изотропного слоя

$$\sqrt{T \cdot S} = H,$$

в то время как для равной ей по мощности анизотропной пачки, представленной совокупностью пропластков,

$$\sqrt{T \cdot S} = \sqrt{\sum_{i=1}^N T_i \cdot \sum_{i=1}^N S_i} = \lambda \cdot H = \tilde{H}.$$

Это приводит к выводу, что при изучении анизотропных пород получаемые значения мощности завышают их истинные значения в λ раз.

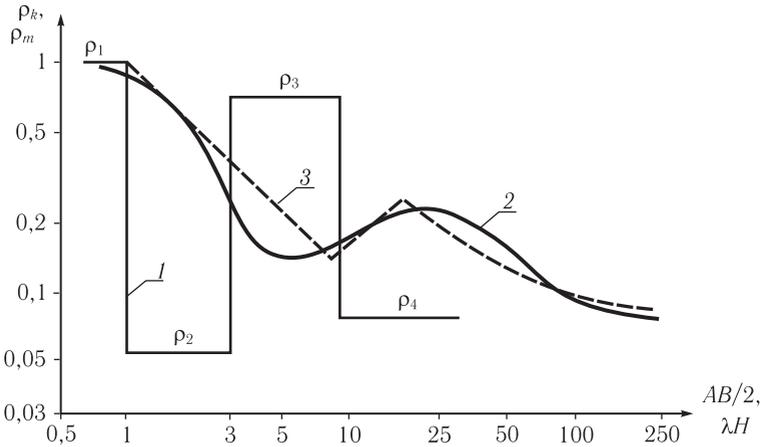


Рис. 1.23. Кривая кажущегося сопротивления (2) и кривая Дар-Заррук (3) для заданной модели среды (1) (По Е. Орелану)

Учитывая, что величина $\rho_k(r)$, измеренная на поверхности горизонтально слоистой среды, связана с ρ_m (см. раздел 1.5), а $\lambda \cdot H_i$ — соответствует глубине залегания i -й границы, получаемое сходство поведения кривой $\rho_k(r)$ с графиком $\rho_m(\lambda H)$ на практике используют в качестве одного из приемов увязки обобщенных слоев, получаемых в результате интерпретации, с геологическим разрезом. График зависимости $\rho_m = \sqrt{\sum_{i=1}^N T_i / \sum_{i=1}^N S_i}$ от $\lambda H = \sqrt{\sum_{i=1}^N T_i \cdot \sum_{i=1}^N S_i}$ (рис. 1.23) получил название кривой Дар-Заррук [Orellana, 1963].

Связь асимптотических значений с обобщенными параметрами среды

Для вывода соответствующих уравнений связи нам потребуются сведения о гиперболических функциях и их асимптотических значениях. Приведем некоторые из них, необходимые для данного анализа.

Свое название гиперболический синус и косинус получили, исходя из внешнего сходства разложения их в степенной ряд с соответствующим разложением для обычного синуса и косинуса:

$$\operatorname{sh} x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots,$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots;$$

$$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots,$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$$

Продолжая данную аналогию, получают гиперболический тангенс ($\operatorname{th} x$) и котангенс ($\operatorname{cth} x$):

$$\operatorname{th} x = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} x} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}; \quad (1.132)$$

$$\operatorname{cth} x = \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{sh} x} = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}}. \quad (1.133)$$

В соответствии с этими формулами определяются характер поведения данных функций, область их существования и асимптотические значения (рис. 1.24, а). В частности:

1) при $x \rightarrow \infty$, $\operatorname{th} x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} = 1$, $\operatorname{cth} x = \frac{1 + e^{-2x}}{1 - e^{-2x}} = 1$;

2) при $x \rightarrow 0$, $\operatorname{th} x \approx x$, $\operatorname{cth} x \approx 1/x$.

Соответственно для обратных гиперболических функций $\operatorname{Arth} x$ и $\operatorname{Arcth} x$ (рис. 1.24, б):

1) при $x \rightarrow \infty$, $\operatorname{Arcth} x \approx 1/x$; $\operatorname{Arth} x$ — не существует;

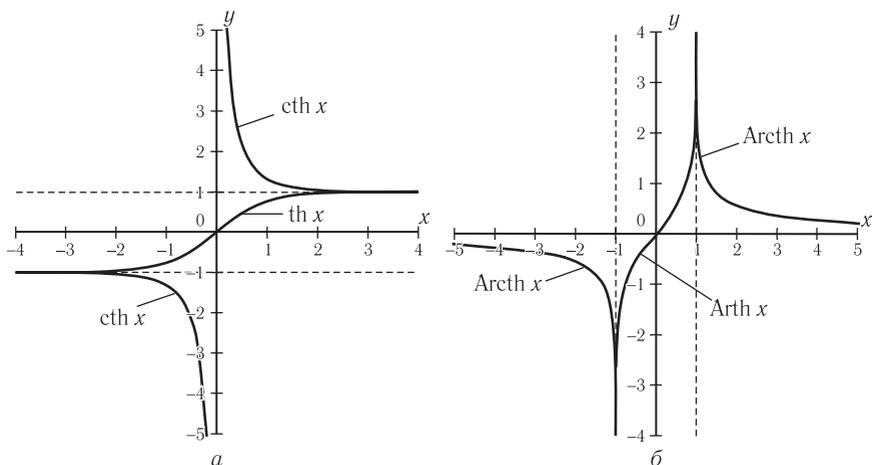


Рис. 1.24. Графики гиперболических функций $y = \text{th } x$, $y = \text{cth } x$ (а) и обратных гиперболических функций $y = \text{Arth } x$, $y = \text{Arcth } x$ (б)

2) при $x \rightarrow 0$, $\text{Arth } x \approx x$, $\text{Arcth } x$ — не существует.

Вернемся к основной нашей задаче — определению связи асимптотических значений кривой кажущегося сопротивления с обобщенными параметрами слоистой толщи. В качестве асимптотических будем считать значения $\rho_k(r)$, соответствующие условию $r \gg z$, где z — глубина залегания подошвы слоистой пачки пород до опорного горизонта.

Рассмотрим эту связь на примере трехслойной среды, сопротивления слоев которой увеличиваются с глубиной ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$).

Выражение для функции $R_1(m)$ в данном случае запишется в виде:

$$R_1(m) = \text{cth} \left(mh_1 + \text{Arcth} \frac{\rho_2}{\rho_1} \text{cth} \left(mh_2 + \text{Arcth} \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \right), \quad (1.134)$$

где $m = 1/r$.

Анализируя почленно последнее уравнение с учетом асимптотических значений гиперболических функций, находим

$$\text{Arcth} \frac{\rho_3}{\rho_2} \approx \frac{\rho_2}{\rho_3}; \quad \text{cth} \left(mh_2 + \frac{\rho_2}{\rho_3} \right) \approx \frac{1}{mh_2 + \frac{\rho_2}{\rho_3}};$$

$$\operatorname{Arcth} \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{1}{mh_2 + \frac{\rho_2}{\rho_3}} \approx \frac{\rho_1 \left(mh_2 + \frac{\rho_2}{\rho_3} \right)}{\rho_2} = \rho_1 \left(m \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right);$$

$$\operatorname{cth} \left(mh_1 + \rho_1 \left(m \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right) \right) \approx$$

$$\approx \frac{1}{mh_1 + \rho_1 \left(m \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right)} = \frac{1}{\rho_1 \left(m \frac{h_1}{\rho_1} + m \frac{h_2}{\rho_2} + \frac{1}{\rho_3} \right)},$$

В результате получаем:

$$R_1(m) \approx \frac{1}{\rho_1 (mS_{1,2} + 1/\rho_3)},$$

где $S_{1,2} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}$ — суммарная продольная проводимость первого и второго слоев.

Подставляя данное выражение в формулу для кажущегося сопротивления (1.114), находим

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \int_0^\infty R_1(m) J_1(mr) m dm \approx r^2 \int_0^\infty \frac{1}{\rho_1 \left(mS_{1,2} + \frac{1}{\rho_3} \right)} J_1(mr) m dm, \quad (1.135)$$

Поскольку пространственная частота связана с разном r соотношением $m = 1/r$, для приближенного решения данного интеграла положим фиксированное значение этой величины в выражении для асимптотики функции $R_1(m)$, то есть в знаменателе последнего соотношения выполним замену $mS_{1,2} = S_{1,2}/r$. Учитывая, что $\int_0^\infty J_1(mr) m dm = 1/r^2$ (см. формулу 1.122) приходим к следующему приближенному асимптотическому выражению для функции кажущегося сопротивления:

$$\rho_k(r) \approx \frac{1}{\frac{S_{1,2}}{r} + \frac{1}{\rho_3}}.$$

В случае произвольного числа слоев n (со значениями сопротивлений слоев, отвечающих условию $\rho_i < \rho_{i+1}$) последнее соотношение запишется в виде

$$\rho_k(r) \approx \frac{1}{\frac{S_{1,n-1}}{r} + \frac{1}{\rho_n}}, \quad (1.136)$$

где

$$S_{1,n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i}.$$

Полученная формула (1.136), связывающая значения кривой кажущегося сопротивления в асимптотической ее области с истинными обобщенными параметрами слоистой толщи $S_{1,n-1}$ и ρ_n , может быть использована и для определения этих параметров по наблюдаемым значениям $\rho_k(r)$, а также для асимптотического ее продолжения в область больших разносов. Действительно, записав уравнение (1.136) для двух соседних разносов (r_j и r_{j+1}) и решая полученные уравнения относительно искомых величин, находим:

$$\rho_n = \Delta r_j / \Delta S_{kj}, \quad (1.137)$$

$$S_{1,n-1} = r_j \left(\frac{1}{\rho_k(r_j)} - \frac{1}{\rho_n} \right) = r_j \left(\frac{1}{\rho_k(r_j)} - \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j} \right), \quad (1.138)$$

где

$$\Delta r_j = r_{j+1} - r_j; \quad \Delta S_{kj} = \frac{r_{j+1}}{\rho_k(r_{j+1})} - \frac{r_j}{\rho_k(r_j)}.$$

Подставив соотношения (1.137), (1.138) в уравнение (1.136) при соответствующем значении j , получаем формулу для асимптотического продолжения кривой $\rho_k(r)$ в область больших разносов измерительной установки

$$\begin{aligned} \rho_k(r_{j+2}) &\approx \frac{1}{\frac{r_{j+1}}{r_{j+2}} \left(\frac{1}{\rho_k(r_{j+1})} - \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j} \right) + \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j}} = \\ &= \frac{1}{r_{j+1} \left(\frac{1}{\rho_k(r_{j+1})} + \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j} \left(\frac{r_{j+2}}{r_{j+1}} - 1 \right) \right)}. \end{aligned} \quad (1.139)$$

Формула (1.139) может быть использована с некоторым приближением и для асимптотического продолжения кривой зондирования в область малых разностей r в диапазоне эффективного влияния первого слоя

$$\rho_k(r_{j-1}) \approx \frac{1}{r_j \left(\frac{1}{\rho_k(r_j)} - \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j} \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} - 1 \right) \right)}. \quad (1.140)$$

Аналогичным образом, выполнив замену в формуле (1.134) cth и Arcth соответственно на th и Arth , выводится формула, связывающая асимптотические значения кривой кажущегося сопротивления с обобщенными параметрами слоистой толщи при уменьшении с глубиной сопротивлений слоев, то есть когда $\rho_{i+1} < \rho_i$.

В этом случае:

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = r^2 \int_0^\infty (mT_{1,n-1} + \rho_n) J_1(mr) m dm, \quad (1.141)$$

и, соответственно,

$$\rho_k(r) \approx \frac{T_{1,n-1}}{r} + \rho_n, \quad (1.142)$$

где

$$T_{1,n-1} = \sum_{i=1}^{n-1} h_i \rho_i.$$

Решая уравнение (1.142) для двух соседних точек, находим выражения для определения сопротивления подстилающего слоя и суммарного поперечного сопротивления вышележащей слоистой толщи:

$$\rho_n \approx \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j}, \quad (1.143)$$

$$T_{1,n-1} \approx r_j (\rho_k(r_j) - \rho_n) = r_j \left(\rho_k(r_j) - \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j} \right), \quad (1.144)$$

где

$$\Delta T_{kj} = r_{j+1} \cdot \rho_k(r_{j+1}) - r_j \cdot \rho_k(r_j); \quad \Delta r_j = r_{j+1} - r_j.$$

Подставив (1.143), (1.144) в формулу (1.142), получаем выражение для асимптотического продолжения кривой $\rho_k(r)$ в область больших и малых разностей установки:

$r \rightarrow \infty$

$$\rho_k(r_{j+2}) \approx \frac{r_{j+1}}{r_{j+2}} \left(\rho_k(r_{j+1}) + \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j} \left(\frac{r_{j+2}}{r_{j+1}} - 1 \right) \right), \quad (1.145)$$

$r \rightarrow 0$

$$\rho_k(r_{j-1}) \approx \frac{r_j}{r_{j-1}} \left(\rho_k(r_j) - \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j} \left(\frac{r_{j-1}}{r_j} - 1 \right) \right). \quad (1.146)$$

Как частный вариант, рассмотрим асимптотические соотношения (1.136) и (1.142) для предельных значений сопротивления подстилающего слоя, то есть для $\rho_n \rightarrow \infty$ и $\rho_n \rightarrow 0$.

При $\rho_n \rightarrow \infty$ формула (1.136) запишется в виде

$$\rho_k(r) \approx \frac{r}{S_{1,n-1}}. \quad (1.147)$$

Прологарифмировав (1.147), получим выражение

$$\ln \rho_k(r) \approx \ln r - \ln S_{1,n-1},$$

представляющее в билогарифмической шкале уравнение прямой с угловым коэффициентом 45° . Данная прямая, получившая название линии S , при $\rho_k(r) = 1$ пересекает ось абсцисс в точке $r = S_{1,n-1}$ (рис. 1.25, а). При этом абсцисса точки пересечения линии S с линией,

проведенной параллельно оси абсцисс при ординате $\rho_k = \rho_l$, согласно (1.127), будет равна суммарной мощности слоистой пачки пород $H = \sum_{i=1}^{n-1} h_i$. То есть,

точки восходящей асимптотической ветви кривой зондирования в случае $\rho_n \rightarrow \infty$ ложатся на прямую линию, наклоненную под углом 45° к оси абсцисс. Этот угол является предельным для горизонтально-слоистых моделей сред. Значение продольной проводимости может быть определено по любой точке этой прямой с помощью соотношения (1.147). Данные выводы и соотношения, полученные для случая восходящей асимптотической ветви, согласуются с реальным поведением теоретических и практических кривых зондирования.

Аналогичным образом из формулы (1.142) в предельном случае $\rho_n \rightarrow 0$ получаем

$$\rho_k(r) \approx \frac{T_{1,n-1}}{r}, \tag{1.148}$$

и, соответственно,

$$\ln \rho_k(r) \approx -\ln r + \ln T_{1,n-1}.$$

То есть, предельный угол асимптотической ветви кривой зондирования относительно оси абсцисс должен составлять 135° . Однако, как показывает практика и характер поведения теоретических кривых $\rho_k(r)$, максимальный угол в случае нисходящей асимптотической ветви кривой $\rho_k(r)$ может достигать почти 110° , что указывает на достаточно грубое приближение соотношения (1.148), являющееся следствием недостаточной точности вычисления интеграла в уравнении (1.141). Определение более точных асимптотических соотношений в случае ниспадающей асимптотической ветви кривой зондирования требует поиска приемов более строгого решения интегрального уравнения (1.141).

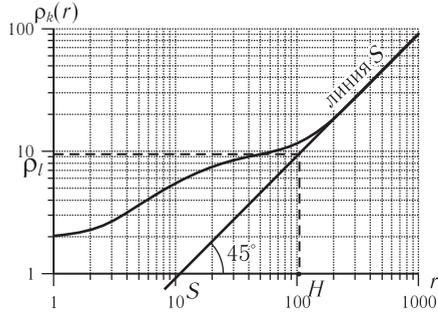


Рис. 1.25. Связь кривой зондирования $\rho_k(r)$ с обобщенными параметрами среды S, H и ρ_l в случае $\rho_n \rightarrow \infty$

1.8. Особенности теории постоянного тока в случае поляризующихся сред

Вызванной поляризацией (ВП) называют явление образования в горных породах поверхностных или объёмных зарядов физико-химического происхождения при пропускании в них постоянного, либо низкочастотного (менее 10 Гц) переменного тока.

Природа вызванной поляризации достаточно сложна [Комаров, 1980], однако основной механизм образования эффектов ВП связан с появлением при определенных условиях емкостных свойств пород, к примеру, в результате накопления электрических зарядов вследствие затрудненного электролитического их движения в поровой жидкости, связанного с малыми размерами пор (соизмеримыми с размером носителей заряда) и наличием двойного электрического слоя на контакте между породообразующими минералами и электролитом, препятствующего свободному движению зарядов. Эти емкостные свойства пород приводят к образованию вторичного электрического поля, наиболее отчетливо проявляющегося при выключении внешнего источника.

При выключении внешнего источника тока это вторичное поле наблюдается в виде ниспадающей примерно по экспоненциальному закону зависимости $\Delta U(t)$ (рис. 1.26). Быстрота и характер спада $\Delta U(t)$ определяются мобильностью носителей зарядов разного знака, которая, в свою очередь, зависит как от интенсивности и длительности пропускания тока, так и от минерального состава пород, текстурных и структурных особенностей, наличия влаги, ее минерализации и химического состава, температуры, давления, что служит основой для геологического истол-

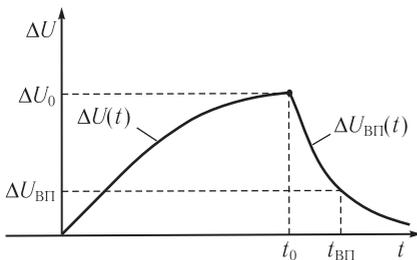


Рис. 1.26. Характер изменения напряжения $U(t)$ при включении электрического тока ($t \leq t_0$) и после его выключения ($t > t_0$) в случае поляризующейся среды

кования результатов наблюдений ВП. Методика наблюдений ВП включает регистрацию стабилизированного поляризующего поля ΔU_0 и измерение вторичного поля $\Delta U_{ВП}$ через заданный интервал времени после его выключения. Впервые идея использования ВП в электроразведке была предложена в 1921 г. К. Шлюмберже.

Для оценки объемной поляризации пород используют величину,

получившую название *поляризуемости*, которую определяют как отношение поля вызванной поляризации $E_{\text{ВП}}$ к полному поляризующему полю E

$$\eta = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_0} = \frac{E_{\text{ВП}}}{E}, \quad (1.149)$$

или

$$E_{\text{ВП}} = \eta \cdot E.$$

Величина η обычно невелика и составляет от нескольких единиц до первых десятков процентов.

Формула для расчета электрического поля в случае однородной среды, обладающей объемной поляризацией, формально (без рассмотрения самого механизма образования ВП) может быть получена следующим образом [Заборовский, 1963]. Учитывая, что поляризационный ток в каждом элементарно малом объеме среды направлен противоположно вызвавшему его поляризующему току, запишем

$$j = j_0 - j_{\text{ВП}} = \frac{1}{\rho} E - \frac{1}{\rho} E_{\text{ВП}} = \frac{1}{\rho} (1 - \eta) E. \quad (1.150)$$

Обозначив

$$\rho^* = \frac{\rho}{1 - \eta},$$

выражение (1.150) можно представить в виде закона Ома для некоторой неполяризующейся среды с удельным электрическим сопротивлением ρ^*

$$j = \frac{1}{\rho^*} E. \quad (1.151)$$

Согласно теоретическим положениям, рассмотренным в п. 1.1, такая замена позволяет использовать основные уравнения и выводы, полученные для неполяризующейся среды, и в случае среды поляризующейся. К примеру, выражение для потенциала электрического поля, возбуждаемого точечным источником на поверхности поляризующейся среды, будет определяться соотношением

$$U = \frac{I\rho^*}{2\pi \cdot r} = \frac{I\rho}{2\pi(1-\eta)r}.$$

Аналогичным образом запишется выражение и для напряженности электрического поля. Можно отметить, что величина электрического поля получается завышенной относительно его значения для неполяризуемой среды на множитель $(1/(1-\eta))$.

При расчете электрических полей для более сложных моделей сред при формировании граничных условий возникает необходимость учета поверхностной и объемной поляризации. Наличие поверхностной поляризации приводит к скачку потенциала при переходе через поверхность раздела, связанную с индуцированием на ней электрических зарядов в виде двойного слоя. Полагая величину скачка потенциала пропорциональной нормальной составляющей плотности тока при перетекании тока, скажем, из среды с сопротивлением ρ_1 в среду с ρ_2 , получаем

$$U_1 - U_2 = k j_n = -k \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \lambda \frac{\partial U_1}{\partial n},$$

где $\lambda = -\frac{k}{\rho_1}$ — коэффициент поверхностной поляризации.

При этом должно выполняться второе граничное условие, выражающее непрерывность нормальной составляющей плотности тока:

$$j_{n1} = j_{n2}; \text{ или } \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n}.$$

При объемной поляризации контактирующих сред второе граничное условие, согласно (1.151), запишется в виде:

$$\frac{1}{\rho_1^*} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2^*} \cdot \frac{\partial U_2}{\partial n}, \text{ или } \frac{1-\eta_1}{\rho_1} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1-\eta_2}{\rho_2} \cdot \frac{\partial U_2}{\partial n}.$$

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Теория методов интерпретации базируется на решении прямых и обратных задач электродинамики. Прямые задачи — расчет элементов поля по заданным параметрам среды, несмотря на всю сложность математической их реализации, не имеют принципиальных трудностей получения однозначного конечного результата. Несоизмеримо более сложными в этом смысле являются обратные задачи, связанные с определением строения и физического состояния геологической среды по значениям электрического поля, измеренным на поверхности либо во внутренних точках среды.

Одной из основных причин этого является некорректность и практическая недоопределенность обратной задачи, приводящие к неоднозначности получаемых результатов и требующие решения целого ряда сложных вопросов, связанных с изучением информационных возможностей метода, оценкой достоверности и геологической содержательности результатов, формализацией объекта исследования адекватно информационным возможностям метода, разработкой эффективных приемов распознавания и подавления различного рода помех, решения методологических вопросов и др., что позволяет рассматривать интерпретацию как сложный творческий процесс, требующий глубокого понимания предмета и физических возможностей метода.

В данной главе будет рассмотрен ряд подходов к решению данных проблем, а также способы и приемы реализации интерпретационного процесса.

2.1. О некорректности обратной задачи электрического зондирования и приемах регуляризации

Проблемы некорректности являются одними из ключевых в решении многих прикладных задач. Они во многом определяют и точность, и достоверность получаемых результатов. Исследованию вопросов, связанных с ними, уделяется исключительно большое внимание [Тихонов, 1963; Тихонов, Арсенин, 1974; Дмитриев, 1987; Страхов, 1999 и др.].

Рассмотрим основные положения теории некорректных задач и подходы к их решению применительно к методу электрического зондирования, с учетом его особенностей и опыта практического применения.

Условия корректной постановки задачи впервые были сформулированы французским математиком Ж. Адамаром [Hadamard, 1902, 1932]. Согласно этим условиям задача считается корректно поставленной, если априори известно, что ее решение существует, оно единственно и устойчиво к малым изменениям исходных данных. В противном случае (при невыполнении хотя бы одного из них), задача считается плохо или некорректно поставленной и, в общем случае, может иметь бесконечное множество различных решений, в том числе выходящих за область физически допустимых значений.

Что касается метода электрического зондирования, то существование решения задачи определяется ее физической детерминированностью. Математическая возможность получения единственного ее решения для горизонтально-однородных сред доказывается теоремой единственности (Langer, 1933; Stevenson, 1934; Тихонов, 1949), из которой следует, что по точным значениям потенциала, заданным вдоль некоторой непрерывной прямой на поверхности наблюдения, можно сделать единственно возможное заключение об изменении проводимости с глубиной.

Однако при практической реализации метода ВЭЗ условия, необходимые для получения единственного решения, обычно не выполняются, поскольку получаемая в результате полевых наблюдений функция кажущегося сопротивления всегда отягощена различного рода погрешностями, значения потенциала замеряются дискретно с шагом, соответствующим примерно геометрической прогрессии со знаменателем 1,3–1,4; реальные геоэлектрические разрезы лишь приближенно аппроксимируются интерпретационными моделями, используемыми для решения обратной задачи. При этом функциональные соотношения в большинстве случаев характеризуются неустойчивостью параметров модели к малым изменениям анализируемого электрического поля.

Указанные причины нарушают условие корректности, приводя к практической ее неединственности в рамках заданной точности наблюдений (δ) и, как следствие, к возможности получения множества решений, иногда как угодно отличных от истинного. То есть обратная задача электрического зондирования в общем случае является некорректно поставленной.

Долгое время в математике считалось, что решать некорректные задачи вообще не имеет смысла. Однако получение физически содержа-

тельной информации в практике решения многих прикладных обратных задач привело к формированию нового раздела математической физики — теории решения некорректных задач, направленной на разработку методов получения приближенных решений, устойчивых к малым изменениям исходных данных. Основы этой теории заложены А. Н. Тихоновым, М. М. Лаврентьевым, В. К. Ивановым, Г. Бейкусом, П. Гильбертом. В ней вводится новая формулировка условий корректности и фундаментальное понятие регуляризирующего оператора.

Рассмотрим суть этой теории на примере электрического зондирования горизонтально-слоистой среды, где связь измеренных значений $\rho_k(r)$ с параметрами данной модели выражается интегральным уравнением (1.114).

Обозначим через x совокупность искоемых параметров модели $x = (h_i, \rho_i, i = 1, n)$, принадлежащих некоторому множеству допустимых решений X , а через f измеренное поле (либо результат его пересчета в функцию $\rho_k(r)$), принадлежащее некоторому множеству возможных значений F , определяемому погрешностями измерений. Пользуясь математической символикой, соотношение (1.114) в этом случае можно представить в виде

$$Ax = f, \quad x \in X, \quad f \in F, \quad (2.1)$$

а отклонение измеренного поля и параметров модели среды от их истинных значений, соответственно,

$$\inf_{f \in F} \|f - \bar{f}\| = \delta; \quad \inf_{x \in X} \|x - \bar{x}\| = \varepsilon,$$

где δ — нижняя граница отклонения измеренного значения поля f от его истинного значения \bar{f} , характеризующая погрешность полевых наблюдений; ε — соответственно точность определения параметром искомой модели среды. Обозначение A , входящее в левую часть (2.1), представляет нелинейный оператор, связывающий наблюдаемое электрическое поле с параметрами слоев, входящих в подынтегральное выражение в виде аргументов гиперболических функций. Неединственность и неустойчивость решения обратной задачи электрического зондирования — следствие свойств данного оператора A .

Согласно доказанной А. Н. Тихоновым теоремы [1963, 1974], если в пространстве X можно выделить некоторое более узкое множество решений M , для которого выполняются условия корректности, то есть,

если априори известно, что принадлежащее M решение существует, оно единственно и устойчиво к малым изменениям f , то обратная задача на этом множестве является корректной и, следовательно, для нее должна выполняться непрерывная зависимость между погрешностью наблюдений и результатами интерпретации

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} x = \bar{x}. \quad (2.2)$$

При этом искомое решение не должно выходить за предел потери чувствительности наблюдаемого поля к изменению параметров среды при заданной величине δ

$$r_m = \inf \frac{\|\Delta f\|_F}{\|\Delta x\|_X} > C(\delta). \quad (2.3)$$

То есть, некорректная по Адамару задача может быть корректной (условно корректной) по Тихонову. Множество M , выбираемое на основе имеющейся дополнительной информации (качественной, количественной, вероятностной), получило название множества корректности.

Таким образом, суть регуляризации сводится к получению приближенного решения некорректно поставленной обратной задачи в рамках δ -эквивалентности (то есть в рамках класса решений, отвечающих погрешности полевых наблюдений δ) устойчивого к малым изменениям исходных данных с помощью различной дополнительной информации, вовлекаемой в процесс решения на основе некоторого принципа отбора.

Для реализации данного процесса предполагается использование регуляризирующего оператора, которым может служить любая совокупность аналитических и вычислительных операций, позволяющая получить решение, удовлетворяющее условиям (2.2) и (2.3). То есть для (2.1) можно построить множество регуляризирующих операторов. Их выбор зависит от разных факторов: вида априорной информации, эффективности вычислительных схем и т. п.

Классическим примером построения регуляризирующего оператора является функционал вида

$$\Phi(\alpha, x) = \|Ax - \bar{f}\|_F^2 + \alpha \Omega(x) = \min, \quad (2.4)$$

где α — параметр регуляризации ($\alpha > 0$).

Данный функционал реализует вариационный принцип регуляризации. Первое слагаемое минимизирует норму расхождения между наблю-

денной и расчетной функциями, второе — минимизирует критерий отбора, отвечающий априорным данным о свойствах среды. Оно играет роль стабилизатора, повышающего устойчивость решения. Таким образом, при минимизации функционала (2.4) ищется решение, которое, с одной стороны, принадлежит множеству эквивалентных решений X_δ , а с другой — компактному множеству M_δ . Получаемое пересечение этих двух множеств и является тем приближенным решением задачи, которое отвечает заданной погрешности наблюдений и априорным данным.

Однако раскрывая общие принципы повышения устойчивости решения некорректной задачи, данная теория не дает количественной меры для оценки степени ее доопределенности, а также необходимого объема и достаточности априорной информации, определяющих соответствие анализируемой модели информационным возможностям наблюдаемого поля (например, допустимой детальности расчленения геоэлектрического разреза при заданной точности, плотности полевых наблюдений и имеющейся априорной информации). Поэтому практическая его реализация часто сталкивается с неопределенностью выбора регуляризирующих параметров. Это относится и к выбору множества корректности M , так как даже при выполнении условия (2.2), практически достижимой погрешности наблюдений δ_0 , в силу свойств оператора решения обратной задачи A^{-1} , при определенных условиях может соответствовать класс решений, для которого $\varepsilon_0 > \varepsilon_{пр}$, где $\varepsilon_{пр}$ — требуемая точность решения.

Оценка чувствительности анализируемой функции к изменению параметров среды (2.3), косвенно указывая на возможность учета данного фактора, также не дает необходимых для этого количественных соотношений.

Попробуем увязать общие теоретические положения рассмотренной выше теории с практикой электроразведочных работ. Опыт применения метода электрического зондирования показывает, что степень некорректности и потребность в использовании дополнительной информации в значительной мере определяются требуемой детальностью восстановления искомой модели среды, то есть степенью доопределенности исходных данных относительно данной модели, соответствия их информационным возможностям метода при ограниченной точности наблюдений. Это наглядно проявляется на примере анализа пределов эквивалентности параметров промежуточного слоя трехслойных кривых электрического зондирования типа H (рис. 2.1, 2.2, 2.3). Рис. 2.1 показывает, что характер зависимости пределов неоднозначности

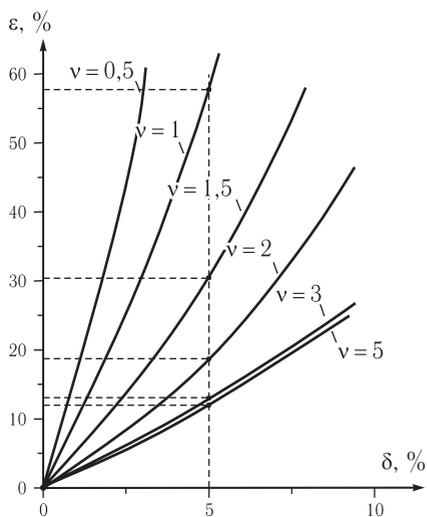


Рис. 2.1. График приближенной зависимости пределов эквивалентности решения ε от величины δ погрешности исходных данных при разной относительной мощности второго слоя $v = h_2/h_1$

а при $v_1 = 0,5$ задача некорректна и выходит за рамки информативности метода, то есть в последнем случае данный разрез может быть заменен эквивалентным разрезом, для которого мощность может принимать любое значение меньше заданного при любом значении сопротивления.

Общая картина, дающая представление о степени некорректности обратной задачи электрического зондирования для трехслойных разрезов типа Н при различных параметрах разреза v_1 и μ_1 и заданной погрешности наблюдений $\delta_0 = 5\%$ (рис. 2.2.), показывает, что некорректность существенно зависит от параметров модели среды. Схематично выделенная на рисунке область «А» охватывает параметры модели, неоднозначность определения которых соизмерима с погрешностью полевых наблюдений ($\delta_0 < \varepsilon \leq 3\delta_0$, δ_0 — погрешность полевых наблюдений); область «В» — включает модели, пределы неоднозначности параметров которых могут принимать значения, значительно превышающие погрешность полевых наблюдений ($3\delta_0 < \varepsilon$); область «С» — соответствует параметрам модели среды, нижний предел которых может принимать как угодно малые положительные значения ($\varepsilon \rightarrow \infty$).

решения от величины погрешностей наблюдения $\varepsilon = f(\delta)$ при фиксированных значениях сопротивлений $\rho_1 = \rho_3$, $\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 0,1$ существенно зависит от относительной мощности второго слоя $v_1 = h_2/h_1$. При $v_1 > 3$ пределы эквивалентности решений соизмеримы с погрешностью полевых наблюдений; по мере уменьшения v_1 погрешность определения параметров резко повышается и, начиная с v порядка 0,5, эти пределы увеличиваются до бесконечно больших значений.

В соответствии с этим можно считать, что при $v_1 > 3$ задача практически корректна, в случае $v_1 = 1,5$ задача некорректна, но решение отвечает информативности метода,

Из рисунка следует, что некорректность повышается как по мере уменьшения относительной мощности выделяемого слоя, так и с увеличением контрастности его электрического сопротивления относительно соседних слоев.

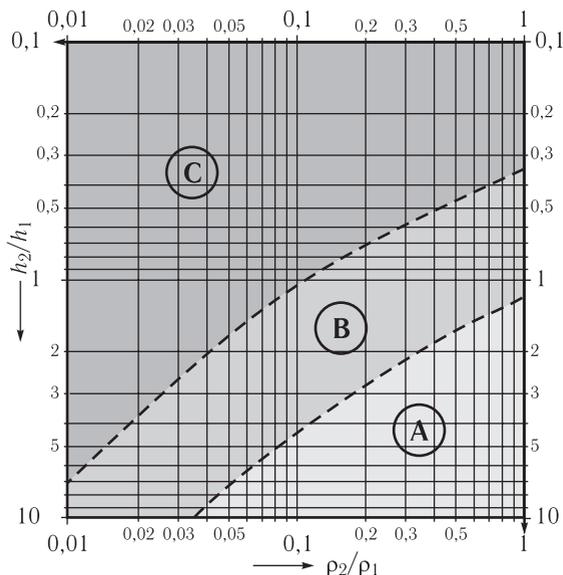


Рис. 2.2. Схематичное представление степени некорректности обратной задачи электрического зондирования для трехслойных разрезов типа *H*: А — область корректных решений ($\epsilon \leq 3\delta$); В — область некорректных решений в рамках информативности метода ($\epsilon > 3\delta$); С — область некорректных решений, выходящих за пределы информативности метода ($\epsilon \rightarrow \infty$)

Приведенный пример, полученный на основе анализа различных номограмм эквивалентности (Пылаев, 1968; Матвеев, 1974; Колесников, 1981 и др.), следует рассматривать лишь как частный случай, иллюстрирующий общие закономерности характера неустойчивости обратной задачи электрического зондирования. Он относится к наиболее простой и благоприятной ситуации (трехслойным разрезам типа *H* с фиксированными значениями первого и последнего слоев). В этом смысле его можно принять за некий предельный случай, отображающий наиболее низкие

из возможных пределов неоднозначности решения. При рассмотрении других типов разреза и увеличением числа слоев эти пределы могут значительно увеличиться.

Вместе с тем, рассмотренный пример показывает, что оценка пределов эквивалентности по результатам интерпретации и их связь с параметрами слоя могут служить количественной мерой недоопределенности обратной задачи и информацией для уточнения решения.

Примером этому может служить фрагмент номограммы пределов S-эквивалентности [Пылаев, 1968], отображенный на рис. 2.3 для

$$\delta = 5 \%. \text{ Обозначив предел эквивалентности как } \Delta P_{\text{экр}} = \left(\frac{2(v_{1,в} - v_{1,н})}{(v_{1,в} + v_{1,н})} \right) \times$$

$\times 100 \%$, где $v_{1,в}$, $v_{1,н}$ — соответственно верхний и нижний пределы относительной мощности слоя, на основании вышеизложенного можно констатировать, что если величина $\Delta P_{\text{экр}} = \Delta P_0$ соизмерима с δ ($\varepsilon \approx \Delta P_0 / 2 < 3\delta$), то задача доопределена (корректна) и не требует привлечения дополнительной информации; в случае, если $\Delta P_0 < \Delta P_{\text{экр}} < \Delta P_{\text{макс}}$ (где $\Delta P_{\text{макс}}$ — некоторый предел, отвечающий условию (2.3)), — задача некорректна и нуждается в регуляризации с привлечением той или иной дополнительной информации (в частности, приближенное значение параметра слоя в этом случае может быть оценено по найденным значениям $v_{1,в}$, $v_{1,н}$; при выполнении соотношения $\Delta P_{\text{экр}} > \Delta P_{\text{макс}}$ — задача некорректна и выходит за рамки информативности метода. Применение регуляризации в этом случае не имеет смысла. Для повышения достоверности решения в этом случае необходимо снижение детальности (загрубление) модели.

Приведение модели в соответствие с информационными возможностями наблюдаемого поля отображает суть *адапционной регуляризации*. Регуляризирующим параметром при адапционной регуляризации является мера загрузки интерпретационной модели.

Можно отметить, что в практической электроразведке в результате анализа и обобщения теоретических и экспериментальных фактов сформировался целый ряд приемов адапционной регуляризации, определивший результативность ее применения. К ним можно отнести:

а) использование интерпретационной геоэлектрической модели, мощность каждого из обобщенных слоев которой превышает мощность вышележащего слоя;

б) применение логарифмического масштаба при отображении и интерпретации кривых зондирования, наиболее соответствующего информативности полевого материала и детальности расчленения разреза;

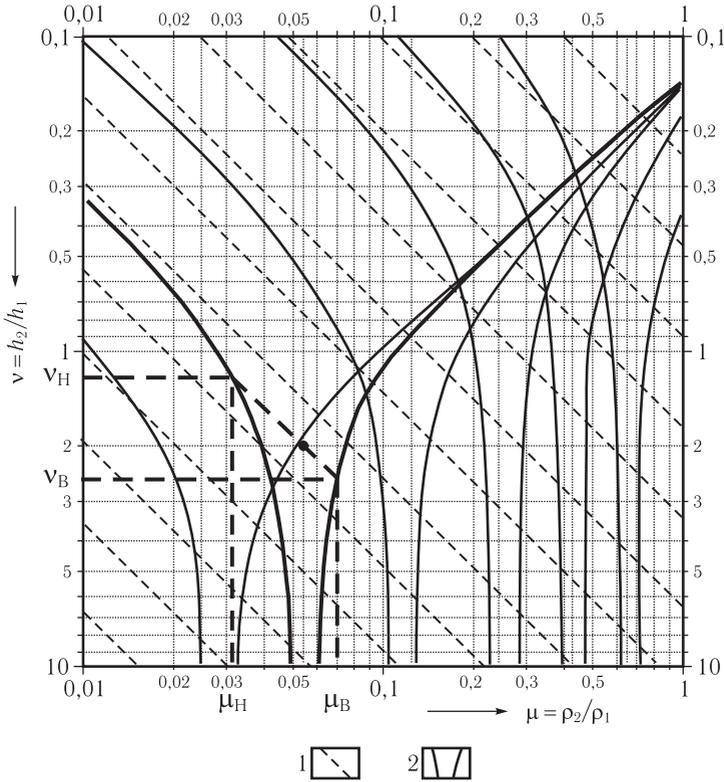


Рис. 2.3. Номограмма для оценки пределов эквивалентности кривых зондирования типа Н (по А. М. Пылаеву) с выделенным фрагментом определения верхнего (v_B, μ_B) и нижнего (v_H, μ_H) пределов изменения относительных параметров слоя. 1 — линии $S = \text{const}$; 2 — предельные кривые возможных значений v и μ

в) привлечение для интерпретации обобщенных параметры слоистых толщ S, T, ρ_r, ρ_t и др., обладающих повышенной устойчивостью к малым изменениям исходных данных.

К тому же информативности электроразведки способствует тот факт, что контрастность пород по электрическому сопротивлению, как правило, значительно превышает пределы неоднозначности (эквивалентности) решения ($\Delta\rho_{\text{аном}} \gg \Delta\rho_{\text{экр}}$). Более проблемными в этом смысле являются задачи структурных построений, при которых интервалы изменения глубин более близки к пределам неоднозначности их определения ($\Delta z_{\text{аном}} \approx \Delta z_{\text{экр}}$).

Все эти особенности в практике интерпретации электрических зондирований часто используются субъективно, на интуитивном уровне, без количественного обоснования точности и достоверности получаемых результатов. Применение теории регуляризации дает принципиальную возможность формализации данного процесса — расширения интерпретационных возможностей метода, обоснования достоверности и точности получаемых результатов. Учитывая, что формирование интерпретационных моделей определяется физико-геологическими особенностями слагающих разрез пород, выбор оптимальной меры расчленения разреза требует выполнения специального анализа параметрического материала. Более подробно связанные с этим вопросы будут рассмотрены в разделе 2.7.

Таким образом, исходя из рассмотренного выше материала, основные направления повышения однозначности интерпретации электрических зондирований связаны с решением следующих задач:

- 1) разработкой способов и приемов снижения уровня помех (уменьшением величины δ);
- 2) разработкой приемов адаптивной регуляризации, приводящей к детальной расчлененности модели в соответствии с информационными возможностями метода при заданной точности и детальности полевых наблюдений;
- 3) разработкой приемов регуляризации в рамках выбранной интерпретационной модели, позволяющей сузить класс эквивалентных решений до пределов, соответствующих необходимой точности решения практической задачи на основе использования дополнительной априорной и апостериорной информации (качественной, количественной, статистической).

Следует отметить, что на принципиальную возможность количественной оценки недоопределенности обратной задачи и ее решения указывают теоретические разработки в смежных науках, в частности, в тео-

рии информации. Один из таких подходов, раскрывающих принципиальную возможность использования теории информации при решении обратных задач геофизики, рассмотрен в работе Б. С. Светова [Светов, 1992]. Проводя аналогию между теорией информации и обратной задачей электроразведки, то есть рассматривая исследуемую геологическую среду как передаваемый «сигнал», который «закодирован» в возбуждаемом в ней электрическом поле, а процесс интерпретации — как процесс декодирования, то есть восстановления первоначальной формы этого сигнала, а в нашем случае — восстановление «закодированной» в электрическом поле геоэлектрической модели среды, показано, что геофизические исследования и передача информации на расстояние в определенном смысле достаточно похожи. А поскольку центральная теорема теории информации, теорема Шеннона [Шеннон, 1963], указывает на возможность восстановления в условиях помех передаваемого сигнала любой сложности и дает способ количественной оценки необходимой для этого дополнительной информации (с помощью так называемого блочного кодирования и декодирования), то можно предположить о возможности теоретического обоснования количественной меры доопределенности обратной задачи и в геофизике.

2.2. Модельность и особенности параметризации обратной задачи электрического зондирования

Одним из важных в теории интерпретации электрических зондирований является вопрос о выборе интерпретационной физико-геологической модели — модели, которая бы с одной стороны наиболее полно отображала основные элементы разреза, определяемые существом решаемой геологической задачи, с другой — отвечала информационным возможностям метода.

К настоящему времени благодаря работам многих исследователей [Скальская, 1948; Заборовский, 1936, 1963; Дмитриев и др. 1973; 1985, 1990; Жданов и др., 1990; Сахарников, 1966; Кусков, 1979, 1985; Хмелевской и др. 1988, 1994; Шкабарня и др., 1985, 1990; Топфер, 1972; Уэйт, 1987; Dey, Morriison, 1979; Sato, 2000 и др.], на основе использования аналитических и численных методов получены решения прямых задач для достаточно широкого класса моделей сред. Однако применение их при решении обратных задач сталкивается с рядом

проблем, из которых можно отметить следующие: 1) отсутствие характерных однозначных признаков распознавания моделей по внешним особенностям наблюдаемых полей; 2) неоднозначность выбора модели в рамках эквивалентных решений; 3) отсутствие универсального математического аппарата и достаточно эффективных технологий выбора и оптимизации моделей при решении практических задач. Все это требует разработки концептуального подхода к выбору интерпретационных моделей в условиях практического применения метода.

Остановимся на некоторых моментах, связанных с формированием интерпретационных моделей в условиях осадочных образований.

Вследствие практической недоопределенности обратной задачи электрического зондирования, вместо реальных геологических напластований, обычно представляющих собой достаточно большое число слоев и тонких пропластков с произвольным соотношением параметров, практически удается изучать лишь некоторую совокупность обобщенных слоев.

Формирование обобщенной модели происходит не произвольно, а по сложным законам, определяющим «вклад» в формирование электрического поля каждого из параметров слоев в отдельности. Причем, часто данному распределению электрических свойств по глубине может соответствовать несколько вариантов расчленения разреза на обобщенные слои. Это приводит к тому, что на соседних зондированиях могут быть получены разные варианты расчленения разреза, что создает трудности отождествления их как между собой, так и с геологическими комплексами пород [Колесников, 1989, 1994]. Определение «золотой» середины между детальностью и разрешающей способностью — одна из проблем интерпретации: закругление модели ведет к потере информации, а повышение детальности — к увеличению пределов неоднозначности.

На практике число обобщенных слоев в геоэлектрическом разрезе обычно составляет порядка 3–5, реже до 6–7. Мощности их увеличиваются с глубиной. Необходимость увеличения мощности слоев с глубиной для повышения однозначности определения их параметров, с физической точки зрения, связана с достаточно быстрым убыванием плотности тока по мере удаления от источника (1.7), (1.26), (1.67), в силу чего поддержание информативности на уровне, соизмеримом для разных частей разреза, требует формирования обобщенных элементов модели, размеры которых также увеличиваются с глубиной.

Каждый из обобщенных слоев, представляющих некоторую совокупность тонких пропластков, в силу своей природы, обладает свойствами анизотропии, то есть решением задачи на физическом уровне строгости (см. раздел 1.5) является совокупность обобщенных слоев с параметрами $\tilde{h}_i = \lambda_i h_i$, $\rho_{ii} = \rho_i / \lambda_i$, $\rho_{ii} = \lambda_i \rho_i$, где h — истинная мощность обобщенного слоя; ρ_r , ρ_t — соответственно его среднее продольное и среднее поперечное сопротивление, λ — коэффициент анизотропии. Величина коэффициента анизотропии для осадочных образований может достигать нескольких единиц [Пылаев, 1968] и не может быть определена непосредственно по результатам наземных наблюдений методом ВЭЗ.

Все это указывает на то, что в общем случае обратная задача недоопределена и неустойчива не только относительно параметров обобщенных слоев, включая анизотропию, но и их числа, и возможных вариантов формирования обобщенных геоэлектрических горизонтов. То есть, решением обратной задачи является физико-математическая модель, определяемая помимо пространственного распределения электрических свойств пород, детальностью, плотностью и точностью полевых наблюдений.

Поиск оптимального числа обобщенных слоев, обеспечивающих максимально возможную детальность расчленения разреза при практически приемлемых пределах неоднозначности решения, составляет одну из важных задач интерпретации.

Известен ряд способов и алгоритмов, в которых делаются попытки использования тех или иных критериев для выбора оптимального числа слоев: по минимальному числу слоев, обеспечивающих заданную невязку между сравниваемыми функциями [Валюс, Рудерман 1972 и др.], величине дисперсии параметров, оцениваемой в процессе информационно-статистического анализа [Порохова и др., 1987], величине аномального проявления слоя, результатам статистического моделирования, по данным анализа параметрических зондирований [Колесников, 1981, 1986]. Каждый из них ориентирован на конкретный метод решения обратной задачи и ввиду отсутствия единых критериев оптимальности не всегда обеспечивает сопоставимые для разных методов результаты.

Многофакторный характер недоопределенности обратной задачи приводит к тому, что для разных зондирований исследуемого участка могут быть получены разные варианты расчленения разреза, отвечающие принципу условно-корректной задачи, но не обеспечивающих необходимой геологической содержательности результатов. Это объясняет беспер-

спективность поиска оптимального решения в рамках одиночных зондирований. То есть критерий отбора множества корректности помимо требований, связанных с математической устойчивостью решения, должен обеспечивать получение геологически содержательной, пространственно согласованной модели среды [Колесников, 1994]. Этот интегральный принцип, предполагающий использование как априорной, так и апостериорной информации о пространственном изменении свойств среды, может служить одним из элементов доопределения задачи.

Интегральная часть разреза, соответствующая области эффективного проникновения тока, дает усредненные характеристики среды и определяет некоторую свободу выбора интерпретационных моделей в рамках заданной погрешности наблюдений, предопределяя возможное существование *модельной эквивалентности*. Один из простых примеров модельной эквивалентности, отмеченный в работе [Топфер, 1972], приведен на рис. 2.4.

Оценка латеральной изменчивости свойств среды, распознавание наличия тех или иных видов локальных неоднородностей в условиях модельной эквивалентности — трудно разрешимая задача, требующая накопления

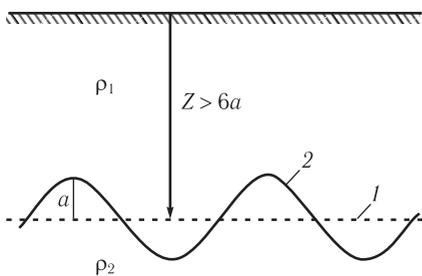


Рис. 2.4. Эквивалентные модели двухслойной среды: 1 — плоская граница; 2 — волнообразная граница раздела

определенного опыта физического и математического моделирования. При решении практических задач для этих целей возможно использование разных подходов, например: 1) на основе выбора модели в рамках заданного модельного класса; 2) путем анализа аномальных эффектов, связанных с отклонением от нормального (фонового) разреза, в качестве которого может быть использована наиболее простая модель, отвечающая основной

геологической версии строения среды. Первый подход основан на реализации метода подбора. Второй — связан с обоснованием фоновой модели и методикой ее использования при выявлении того или иного вида неоднородностей реальной геологической среды.

Рассмотрим один из приемов реализации второго подхода. Для этого введем понятие *квазигоризонтально-слоистой модели среды*, под которой будем понимать модель, аппроксимирующую реальный разрез

в окрестности точки зондирования горизонтально-слоистой средой с точностью до эквивалентного модельного класса.

Эта модель, с одной стороны, наиболее адекватна осадочным геологическим образованиям, а с другой, в силу того, что на результаты наблюдений наибольшее влияние оказывает ограниченная часть геологической среды, определяемая положением приемной линией (см. раздел 1.4), позволяет формировать из одномерных модельных элементов, получаемых в результате интерпретации отдельных зондирований, трехмерные модели, отображающие строение и пространственное изменение электрических свойств исследуемой среды в рамках модельной эквивалентности. Процесс интерпретации, реализуемый на ее основе, обеспечивает оперативность анализа, возможность распознавания различного рода помех, оценку достоверности результатов. В качестве критерия правомерности использования данной модели служит величина расхождения расчетного и наблюдаемого полей, не превышающая погрешность полевых наблюдений.

В случае горизонтально-неоднородных сред с участками, не укладывающимися в рамки данной модели (выходящими за рамки δ -эквивалентности), использование ее на первом этапе истолкования позволяет получить первое представление о строении среды, степени ее латеральной изменчивости, а также информацию о целесообразности применения для интерпретации более сложных моделей. При этом, чем более точно будет решена первая задача, тем проще становится процесс «угадывания» моделей более высокого порядка. То есть процесс интерпретации в рамках модельного подхода можно рассматривать как комплексную задачу, одним из элементов которой является метод последовательного распознавания моделей, начиная с наиболее универсальных и хорошо изученных из них.

Практика показывает, что применение такого подхода при интерпретации электрических зондирований позволяет восстанавливать с удовлетворительной точностью геоэлектрический разрез, иногда существенно отличный от горизонтально-слоистого. Эта модель охватывает широкий класс практических ситуаций и является наиболее универсальной при изучении осадочных образований. Границы ее применимости, на наш взгляд, значительно шире, чем это принято считать, и определяются в первую очередь совершенствованием всего комплекса способов и приемов интерпретации, расширяющим возможности изучения реальных сред.

2.3. О методологии интерпретации электрических зондирований

Многоплановый характер причин, определяющих точность, достоверность, геологическую содержательность результатов электрического зондирования, связанных с проблемами некорректности обратной задачи, разнообразием подходов к их решению, специфическими особенностями формирования интерпретационных моделей, разнородностью факторов, оказывающих влияние на наблюдаемое поле, разнообразием видов и форм использования априорной информации, отсутствием четких критериев оценки информативности метода при решении конкретных геологических задач, порождает необходимость поиска и обоснования методологических решений в организации интерпретационного процесса.

Особо важную роль это играет при создании компьютерных технологий по обработке и количественной интерпретации результатов площадных съемок электрического зондирования, содержащих большие объемы наблюдаемых и априорных данных.

В соответствии с работой [Светов, Бердичевский, 1998], под методологией в прикладной геофизике будем понимать учение о принципах и способах эффективного получения максимально достоверных результатов, полезных для решения поставленной геологической задачи. Методологический подход направлен на наиболее полное извлечение полезной информации из имеющейся совокупности наблюдаемых и априорных данных. В данном случае он охватывает широкий круг вопросов истолкования результатов наблюдений, связанных с оценкой возможности решения поставленной задачи при заданном объеме и информативности исходных данных, рациональным использованием способов и приемов снижения влияния различного рода помех, выбором эффективных путей доопределения задачи при имеющемся наборе априорной и апостериорной информации и др.

Ниже рассмотрена одна из попыток выделения ряда методологических принципов, которые могут способствовать рациональной организации интерпретационного процесса. В качестве базовой основы для этого использованы известные теоретические положения и опыт практической электроразведки.

Модельный принцип, основанный на использовании методов численного (либо физического) моделирования электрических полей, является одним из наиболее значимых элементов при обосновании возможности реше-

ния тех или иных задач, выбора рациональных методик наблюдений, оценки достоверности получаемых результатов, их соответствия теоретическим положениям и информационным возможностям метода.

Интегральный принцип предполагает согласованную интерпретацию совокупности зондирований, отвечающую интегральной природе метода исследования и пространственно-временной взаимозависимости формирования геологических образований. Аналогичный принцип, как достаточно эффективное средство повышения помехоустойчивости, используется и в смежных областях, в частности, в теории передачи информации в виде блочного кодирования [Светов, 1994]. Совместное рассмотрение результатов зондирования, нацеленное на выделение регулярной части разреза, отображаемой результатами площадных наблюдений, ограничивает класс возможных решений и, в принципе, позволяет получать дополнительную информацию об исследуемой геоэлектрической модели среды.

Принцип учета информационных возможностей метода, выражающий согласование детальности расчленения исследуемой среды с информационными возможностями метода, связан с оценкой и учетом ограниченных информационных возможностей каждого геофизического метода. Нарушение его может приводить к заведомо недостоверным результатам, либо замене искомого решения результатами другого метода, используемыми в качестве априорной информации. При этом в отличие, скажем, от волновых методов геофизики (в частности, сейсморазведки), для которых известны критерии количественной оценки разрешающей способности, основанные на сопоставлении размеров выделяемых объектов с длиной волны, в потенциальных методах подобные критерии отсутствуют. Вместе с тем, результаты численного моделирования и практика электроразведочных работ свидетельствуют о наличии физических пределов применения потенциальных полей при изучении строения геологических сред. Это на схематичном уровне отображено, в частности, вышеприведенным рис. 2.2. При попытках добиться чрезмерной детальности, не обеспеченной точностью и детальностью съемки, существует вероятность выхода за рамки информационных возможностей метода, где применение любых приемов регуляризации не может обеспечить достоверности решения.

Принцип разделения физического и геологического этапов истолкования, учитывающий разную природу двух основных составляющих интерпретационного процесса. Задачей первого из них является поиск решения на физическом уровне строгости в рамках информативно-

сти метода. Задача второго — выбор геологической гипотезы строения среды в классе эквивалентных физических решений в соответствии с априорными представлениями о разрезе. Расчленение процесса интерпретации на отдельные, отличающиеся по своей природе, элементы уменьшает возможность смешения разнородных погрешностей и позволяет более обоснованно подходить к их минимизации. В этом смысле регуляризацию обратной задачи можно рассматривать как создание способов и приемов, обеспечивающих приближенное решение некорректной задачи путем вовлечения каждого из видов дополнительной информации на тех этапах интерпретационного процесса, где этот вид информации наиболее эффективен и отвечает природе этапа.

Статистический принцип оценки и принятия решений учитывает наличие случайной составляющей в результатах полевых наблюдений и вероятностную природу распознавания геологических объектов.

Принцип эквивалентности, основанный на использовании существующей взаимозависимости между параметрами эквивалентных решений через посредство обобщенных параметров слоистых толщ, значительно более устойчиво и надежно определяемых по результатам интерпретации, чем сами параметры слоев. В простейших случаях это выражается в выполнении соотношений между эквивалентными характеристиками слоев (h_i, ρ_i) типа $S_i = h_i / \rho_i \approx \text{const}$ (при $\rho_i < \rho_{i+1}$); $T_i = h_i \cdot \rho_i \approx \text{const}$ (при $\rho_i < \rho_{i+1}$) [Пылаев, 1968; Матвеев, 1974, 1990; Хмелевской, 1984 и др.]. Подобные соотношения в ряде случаев могут обеспечивать достаточно простые приемы использования априорной количественной информации при уточнении решения.

Ввиду отсутствия универсальных методов решения обратных задач при изучении сложнопостроенных трехмерных моделей сред в условиях зашумленности и ограниченной точности исходных данных, одной из методологических задач является выбор в рамках модельной эквивалентности модели, которая бы наиболее адекватно отображала основные особенности изучаемого разреза и обеспечивала наиболее высокую технологичность ее определения, то есть наиболее простыми средствами и с наименьшими вычислительными трудозатратами получать решения, отвечающие максимальной информативности метода и исследуемой модели среды. Для этого наиболее естественным является подход, основанный на последовательном усложнении модели, начиная от наиболее простой и хорошо изученной из них, отвечающей регулярной части наблюдаемого поля

и геологическим представлениям о разрезе, к более сложным модельным построениям. Критерием меры усложнения модели может служить поле остаточных аномалий, характеризующее степень расхождения расчетного и наблюдаемого полей относительно уровня погрешностей наблюдений. Моделью начального приближения при изучении осадочных образований может служить квазигоризонтально-слоистая модель, позволяющая получать начальное приближение трехмерной модели среды в рамках информативности метода.

2.4. Анализ искажений и прединтерпретационная регуляризация полевого материала

Снижение уровня погрешностей полевых наблюдений является одним из необходимых условий повышения однозначности решения обратной задачи электрического зондирования.

Можно выделить несколько видов помех, возникающих в процессе получения, обработки и интерпретации экспериментальных данных:

1) аппаратные помехи, определяемые классом точности измерительных приборов, их защищенностью от внешних условий (электромагнитных полей, атмосферных факторов и др.);

2) методические помехи, обуславливаемые неточностью пространственного расположения питающих и приемных линий измерительных установок;

3) «геологические помехи», под которыми будем понимать те особенности (элементы) разреза, которые не представляют интереса при решении конкретной задачи, например, влияние приповерхностных неоднородностей при изучении строения и физических свойств глубинных горизонтов, влияние рельефа местности и т. п.;

4) техногенные помехи, к которым можно отнести влияние различных подземных технических сооружений (трубопроводов, скважин, коммуникаций, промышленных сооружений и т. п.), которые нередко оказываются на исследуемых территориях и в силу их влияния на измеряемое электрическое поле осложняют истолкование результатов наблюдений;

5) «модельные помехи», обусловленные отклонением реальной геологической среды от используемой интерпретационной модели;

6) помехи, связанные с особенностями поведения в реальной среде низкочастотных полей, используемых в методе сопротивлений (поверхностный эффект и т. п.).

Аппаратурные и методические помехи обычно не велики по величине и носят в основном случайный характер. Суммарная погрешность, связанная с этими помехами, оцениваемая в процессе полевых измерений путем выполнения контрольных зондирований, составляет обычно не более 3–5 %. Снижение уровня данного вида помех основывается на повышении точности наблюдений и использовании статистических приемов обработки получаемых результатов.

Наибольшее влияние на результаты интерпретации оказывают, как правило, геологические, техногенные и модельные помехи. Распознавание их проявления в наблюдаемых электрических полях, количественная оценка и снижение уровня требуют физико-математического обоснования с использованием приемов численного (или физического) моделирования.

Вопросам распознавания и подавления различного рода помех посвящено большое число работ [Альпин, 1945; Матвеев, 1974; Шкабарня, Кияшко 1990; Хмелевской, Шевнин и др, 1988, 1994; В. П. Колесникова, 1981, 2001; Куфуд, 1984 и др.].

Широкие возможности в решении данной проблемы появились в связи с разработкой способов и программ численного моделирования в двумерно- и трехмерно-неоднородных средах [Дмитриев, Захаров, 1973; Кусков, 1979, 1985; Модин, Яковлев и др., 1992; Серебrenникова, 1987; Dey, Morisson, 1979 и др.].

Физическое объяснение и механизм образования большинства видов искажений связаны с гальваническими эффектами перераспределения плотности электрического тока в проводящей среде (эффектами экранирования тока высокоомными включениями, повышением концентрацией его внутри объектов относительно повышенной проводимости и т. п.). На качественном уровне характер влияния различных неоднородностей можно оценить с помощью формулы (1.67).

Разработка приемов снижения уровня искажений требует накопления и обобщения результатов математического моделирования электрических полей для различных геологических ситуаций. Рассмотрим с помощью математического моделирования влияние на результаты электрического зондирования различных видов помех, возникающих в процессе полевых наблюдений.

Оценка погрешностей наблюдений, связанных с конечностью длины приемной линии

При проведении полевых наблюдений методом ВЭЗ поддержание измеряемой разности потенциалов в пределах, обеспечивающих их уверен-

ную регистрацию, достигается главным образом за счет соответствующего изменения длины приемной линии MN . Это изменение обычно сопровождается смещением кривой кажущегося сопротивления вдоль оси сопротивлений. Поэтому получаемые экспериментальные кривые $\rho_k(r)$ состоят из нескольких взаимно перекрывающихся отрезков, каждый из которых соответствует одной из использованных линий MN . Расхождения в области перекрытий (так называемых «ворот») могут достигать десятков процентов [Кошляков, 1967; Колесников, 1981; Боголюбова, Боголюбов, 1986 и др.].

Поскольку способы интерпретации обычно предполагают непрерывность кривых кажущегося сопротивления, экспериментальные графики зондирования перед интерпретацией приводятся к виду непрерывной функции. От правильности устранения перекрытий во многом зависит точность исходной информации и достоверность получаемых результатов.

Рассмотрим влияние двух основных факторов образования перекрытий — относительной длины приемной линии в случае горизонтально-слоистой среды и приповерхностных неоднородностей разреза. Расчеты выполним на примере четырехэлектродной установки Шлюмберже.

1. Влияние длины приемной линии на результаты электрического зондирования в случае горизонтально-слоистой среды

Для оценки влияния длины приемной линии на результаты электрического зондирования воспользуемся формулой кажущегося сопротивления для двухслойной модели среды. Величину отклонения, связанного с конечностью MN , будем определять по формуле:

$$\delta(r) = \frac{\rho_k(\tilde{r}) - \rho_k(r)}{\rho_k(r)} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

где

$$\rho_k(\tilde{r}) = \rho_1 \left[1 + 2 \frac{(\tilde{r} + l)\tilde{r}}{1} \sum_{n=1}^N k^{n_{1,2}} \left(\frac{1}{\sqrt{\tilde{r}^2 + (2nh_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(\tilde{r} + l)^2 + (2nh_1)^2}} \right) \right]; \quad (2.6)$$

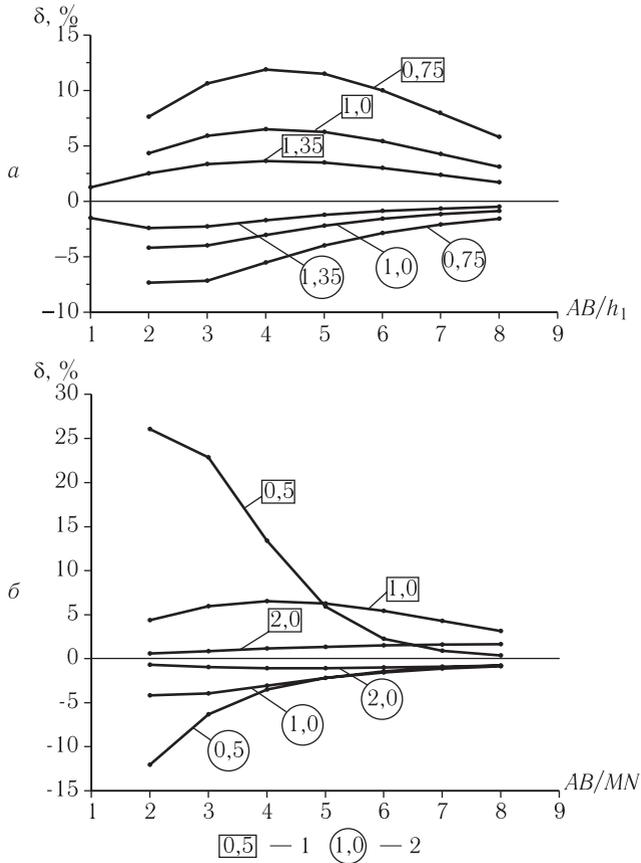


Рис. 2.5. Графики отклонения кажущегося сопротивления от нормального значения в зависимости от относительной мощности первого слоя (а) и относительной длины приемной линии (б). Шифр кривых — h_1/MN . 1 — $\rho_2/\rho_1 = 1/10$; 2 — $\rho_2/\rho_1 = 10$.

$$\rho_k(r) = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^N k_{1,2}^n \frac{r_3}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right]; \quad (2.7)$$

$$k_{1,2} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1};$$

$\rho_k(\tilde{r})$ и $\rho_k(r)$ — значения кажущегося сопротивления соответственно для конечного размера приемной линии MN и для случая, когда $MN \rightarrow 0$; $l = MN$ — длина приемной линии; $r = AB/2$ — разнос питающей линии; $\tilde{r} = r - l/2$ — расстояние от питающего электрода до ближайшего приемного электрода в случае конечного MN ; ρ_1, ρ_2 — удельные сопротивления соответственно первого и второго слоев; h_1 — мощность первого слоя.

Зависимость $\delta(r)$ от соотношения параметров AB, MN и h_1 при достаточно высокой для практических ситуаций контрастности пород ($\rho_2/\rho_1 = 1/10$) и $\rho_2/\rho_1 = 10$) (рис. 2.5) показывает, что величина отклонения кажущегося сопротивления от нормального значения убывает по мере увеличения отношений AB/MN и h_1/MN , и при $AB/MN \geq 5$ становится соизмеримым с погрешностью полевых наблюдений (примерно 5 %). С уменьшением относительной величины приемной линии MN/h_1 характер смещения кривой зондирования по оси сопротивлений приближается к параллельному.

2. Влияние локальных приповерхностных неоднородностей на результаты электрического зондирования при конечной длине приемной линии

Для оценки влияния локальных поверхностных неоднородностей на результаты электрического зондирования при заданной длине MN воспользуемся моделью полусферической неоднородности, расположенной на границе раздела земля — воздух.

Потенциал точечного источника силы I на поверхности полупространства в этом случае можно выразить с помощью следующих соотношений [Заборовский, 1936]:

При $\theta = 0$

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(\sigma_1 - \sigma_2)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1}c^{n+1}} \right], (d > a, c > a); \quad (2.8)$$

$$U_2 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(\sigma_1 - \sigma_2)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{c^n}{d^{n+1}} \right], (d > a, c < a); \quad (2.9)$$

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\sigma_2} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)(\sigma_2 - \sigma_1)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{d^n}{c^{n+1}} \right], (d < a, c > a); \quad (2.10)$$

$$U_2 = \frac{I}{2\pi\sigma_2} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)(\sigma_2 - \sigma_1)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{d^n c^n}{a^{2n+1}} \right], (d < a, c < a); \quad (2.11)$$

При $\theta = \pi$

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{n(\sigma_1 - \sigma_2)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{a^{2n+1}}{d^{n+1} c^{n+1}} \right], (d > a, c > a); \quad (2.12)$$

$$U_2 = \frac{I}{2\pi\sigma_1} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{n(\sigma_1 - \sigma_2)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{c^n}{d^{n+1}} \right], (d > a, c < a); \quad (2.13)$$

$$U_1 = \frac{I}{2\pi\sigma_2} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(n+1)(\sigma_2 - \sigma_1)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{d^n}{c^{n+1}} \right], (d < a, c > a); \quad (2.14)$$

$$U_2 = \frac{I}{2\pi\sigma_2} \left[\frac{1}{l} + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(n+1)(\sigma_2 - \sigma_1)}{n\sigma_2 + (n+1)\sigma_1} \frac{d^n c^n}{a^{2n+1}} \right], (d < a, c > a), \quad (2.15)$$

где c — расстояние от центра полусферы до точки наблюдения; d — расстояние от источника до центра полусферы; l — расстояние от источника до точки наблюдения; a — радиус полусферы; σ_2, σ_1 — соответственно удельная проводимость полусферы и вмещающей среды; θ — угол между направлениями от центра полусферы до источника и от центра полусферы до точки наблюдения.

Используя соотношения (2.8)–(2.15), можно рассчитать величину кажущегося сопротивления при любом положении электродов измерительной установки относительно неоднородности и оценить влияние последней на результаты зондирования. Ниже рассматриваются результаты такого анализа для четырехэлектродной установки Шлюмберже.

На рис. 2.6 показано отклонение функции кажущегося сопротивления от нормального значения в зависимости от положения неоднородности относительно приемных и питающих электродов при фиксированном значении отношения $MN/AB = 1/25$ и $\rho_2/\rho_1 = 1/3$. Влияние неоднородности оценивалось в процентах по формуле:

$$\varepsilon(r, x) = \frac{\hat{\rho}_k(r, x) - \rho_k(r, x)}{\rho_k(r, x)} \cdot 100\%, \quad (2.16)$$

где $\hat{\rho}(r, x)$, $\rho(r, x)$ — кажущееся сопротивление соответственно при наличии полусферической неоднородности и для однородного полупространства; $r = AB/2$ — полуразнос питающей линии; x — расстояние от центра измерительной установки до центра полусферы. Анализируя особенности графика, можно отметить, что величина отклонения в случае прохождения приемного электрода через неоднородность значительно превосходит соответствующее отклонение для случая, когда около неоднородности оказывается питающий электрод. Отклонение усиливается с увеличением размера неоднородности относительно длины приемной линии и с увеличением соотношения между сопротивлениями неоднородности и вмещающей среды.

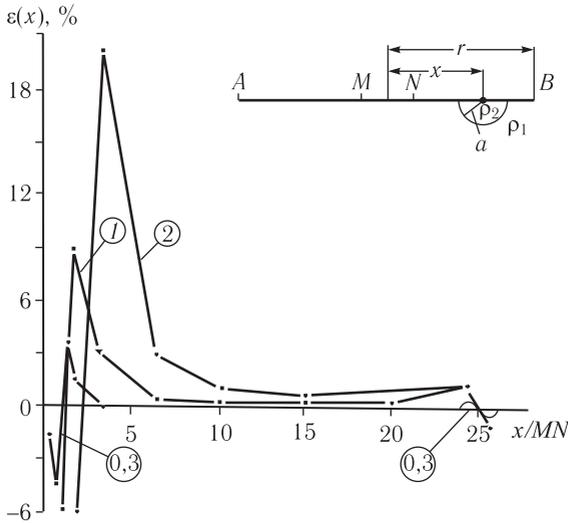


Рис. 2.6. График отклонения функции кажущегося сопротивления от нормального значения при разных положениях полусферической неоднородности относительно электродов установки ($MN/AB = 1/25$; $\rho_2/\rho_1 = 3$). Шифр кривых — $2a/MN$

Учитывая, что влияние неоднородности, расположенной вблизи питающей линии, на функцию $\rho_k(r)$ незначительно, рассмотрим характер образования разрывов для случая, когда неоднородность находится в области приемной линии. График, выражающий зависимость величины $\varepsilon(r)$ от длины AB при положении неоднородности в области приемной линии, приведен

на рис. 2.7. Из рисунка видно, что при достаточном удалении питающих электродов влияние неоднородности выражается в завышении или занижении всей кривой $\rho_k(r)$ на некоторую, примерно постоянную, величину. Переход на новое MN в этом случае практически приводит к параллельному смещению всего отрезка кривой зондирования по оси сопротивлений. По мере увеличения отношения MN/AB влияние неоднородности значительно усиливается и носит нелинейный характер. В этом случае кривые кажущегося сопротивления для разных MN могут иметь близкие к параллельным, непараллельные и пересекающиеся перекрытия.

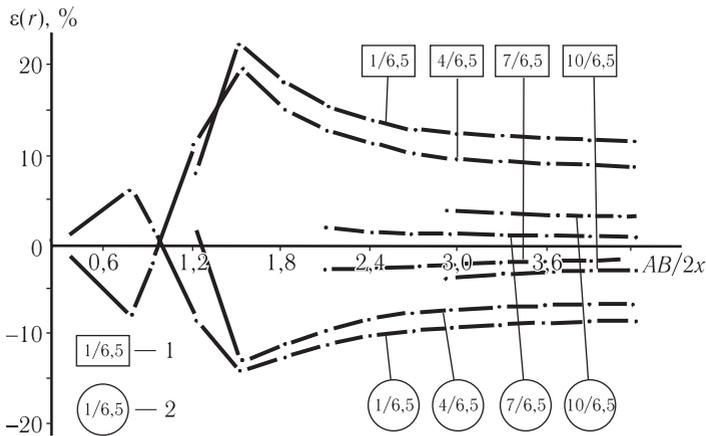


Рис. 2.7. Графики отклонения функции кажущегося сопротивления от нормального значения в зависимости от пространственного положения питающих (AB) и приемных (MN) электродов относительно полусферической неоднородности. Шифр кривых — $MN/2x$. 1 — неоднородность относительно низкого сопротивления $\rho_2 = \rho_1/2$; 2 — относительно высокого сопротивления $\rho_2 = 3\rho_1$

Анализ влияния локальных неоднородностей на результаты электрического зондирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Смещения сегментов кривой кажущегося сопротивления, обусловленные влиянием локальных неоднородностей, по величине могут достигать десятков процентов. При этом, если $MN \ll AB$ и длина питающей линии AB намного превышает размер неоднородности, изменение положения измерительной линии приводит к практически параллельному смещению кривой $\rho_k(r)$ по оси сопротивлений.

2. Наличие непараллельных и пересекающихся перекрытий на кривой зондирования свидетельствует о присутствии неоднородности вблизи приемной линии и возможных значительных искажениях измеренных значений $\rho_k(r)$ в этой области. Искажения носят нелинейный характер и могут являться причиной выделения ложных слоев при интерпретации данных зондирования. Устранение такого типа искажения надежнее осуществлять методическим путем, добиваясь параллельности перекрытий путем смещения измерительной установки.

3. Параллельность перекрытий является лишь необходимым, но не достаточным условием отсутствия искажений функции $\rho_k(r)$. Для получения более достоверных сведений о них необходима дополнительная информация о приповерхностной части разреза — размерах неоднородностей, их расположении относительно электродов установки, соотношении сопротивлений неоднородностей и вмещающей среды.

Учитывая разный характер и величину воздействия на результаты электрометрических наблюдений гальванических эффектов, связанных с положением неоднородности относительно приемной и питающей линий, влияние неоднородностей, находящихся вблизи приемного (потенциального) электрода, получило название *P*-эффекта, а вблизи питающего (токового) электрода — *C*-эффекта [Хмелевской, Шевнин и др., 1988, 1994].

На рис. 2.8, *a* (см. вклейку) приведены результаты численного 3D-моделирования электрических зондирований для модели локального тела, погруженного в однородную среду. В качестве способа измерений использована методика СЭЗ [Бобачев, Урусова и др., 1995].

На полученных разрезах кажущихся сопротивлений отчетливо видны характерные особенности проявления эффектов, связанных с влиянием приповерхностных неоднородностей: «сквозной» характер аномалии, характерный для *P*-эффекта, и аномалии в виде симметрично расположенных относительно точки наблюдения наклонных линейных зон, отображающих проявление *C*-эффекта (неоднородность вблизи источника).

При электрическом зондировании *P*-эффект приводит к квазиконформному искажению кривых ВЭЗ, т. е. кривые зондирования смещаются по оси сопротивлений, почти не меняя своей формы, а в случае *C*-эффекта — к неконформному, влияющему на характер поведения кривой зондирования. Поскольку *P*-эффект по величине значительно превышает *C*-эффект. (см. рис. 2.6, 2.8), можно утверждать, что определяющее

влияние на образование «ворот» на кривых зондирования при изменении длины приемной линии связано с проявлением P -эффекта.

Влияние техногенных объектов на результаты электрического зондирования

Технические подземные сооружения (трубопроводы, подземные коммуникации, скважины и др.), расположенные в пределах исследуемого участка, в силу значительной контрастности их сопротивлений относительно вмещающей среды, способны оказывать существенное влияние на результаты электроразведочных наблюдений.

Для количественной оценки этого влияния рассмотрим результаты численного моделирования электрических полей на примере горизонтально и вертикально расположенных линейных объектов, погруженных в однородную среду.

А) Оценка влияния горизонтально расположенных линейных объектов на результаты электрического зондирования

Для оценки влияния линейных горизонтально вытянутых объектов воспользуемся выражением потенциала, полученным для модели тела цилиндрической формы бесконечной длины и относительно малого сечения, погруженного в однородное полупространство [Уэйт. 1987].

Расчетная формула для трехэлектродной измерительной установки при перпендикулярном расположении профиля относительно линейного объекта будет иметь следующий вид

$$\rho_k(r) = \frac{2\pi r}{I} (U_0 + U_1), \quad (2.17)$$

где
$$U_0 = \frac{I}{\pi^2} \int_0^{\infty} K_0(mr) dm;$$

$$U_1 = \int_0^{\infty} P(m) \left\{ K_0 \left(m \left(r^2 + (r-d)^2 \right)^{1/2} \right) + K_0 \left(m \left(h^2 + (r-d)^2 \right)^{1/2} \right) \right\} dm;$$

$$P(m) = -\frac{I\rho}{\pi^2} \frac{K_0 \left(m \left(h^2 + d^2 \right)^{1/2} \right)}{K_0(mc) + K_0(2mh_0)};$$

U_0 и U_1 — соответственно значения потенциала, создаваемого источником поля в однородной среде и вторичного потенциала, обусловленного током в проводящем линейном проводнике; K_0 — модифицированная функция Бесселя нулевого порядка; ρ — удельное электрическое сопротивление вмещающей среды; r — расстояние от питающего электрода до точки наблюдения; d — кратчайшее расстояние от питающего электрода до линии, являющейся проекцией трубопровода на земную поверхность; h — глубина залегания трубопровода; c — радиус цилиндра; m — переменная интегрирования.

Формула (2.17) получена в предположении, что радиус тела мал по сравнению с расстоянием ($h + d$), а его проводимость во много раз превышает проводимость вмещающей среды.

Один из примеров численного моделирования, отображающий основные особенности аномального поля, связанного с влиянием трубопровода, представлен на рис. 2.8, б (см. вклейку). Численные расчеты выполнены для следующих параметров модели среды и измерительной установки: глубина залегания трубопровода $h = 1,5$ м; шаг между пикетами по профилю $x = 25$ м; разносы питающей линии установки $r = AB/2$ менялись в интервале от 1,5 до 150 м. Трубопровод ориентирован перпендикулярно линии наблюдений и находится на пикете 25 в 575 м от начала профиля.

Результаты моделирования показывают, что аномальное проявление линейного проводящего объекта на разрезе кажущихся сопротивлений отображается в виде узколокализованной аномальной зоны пониженных значений кажущегося сопротивления, имеющей «сквозной» (пронизывающий весь разрез от начальных до конечных разносов питающей линии) характер.

Ширина аномальной зоны увеличивается с глубиной от первых метров (при разносах $AB/2$ до 10 м) до первых десятков метров (при разносах $AB/2$ до 100 м). Величина аномалии при этом уменьшается от 45 % в центре аномальной зоны, до 7 % на ее окраине. В условиях неоднородности электрических свойств среды и «зашумленности» наблюдаемых данных наиболее отчетливо проявляется в основном центральная часть аномалии.

Величина и характер поведения графиков $\rho_a(r)$ показывают, что при изучении техногенных объектов линейного типа (трубопроводы, кабели и др.) наименьшие искажения и наиболее информативные результаты

обеспечиваются при расположении измерительной установки в крест линейного объекта, по возможности с симметричным расположением пикетов относительно него. Это позволяет более отчетливо разделять влияние техногенного объекта и относительное изменение свойств среды.

Следует отметить, что в условиях практического применения величина аномалии существенным образом зависит от состояния антикоррозийного покрытия трубопровода, являющегося по своему составу и свойствам изолятором для электрического тока. При хорошем состоянии антикоррозийного покрытия проявление трубопровода становится слабозаметным в наблюдаемых полях. Физически это объясняется гальваническими эффектами перераспределения плотности электрического тока в среде. При наличии в ней хорошо проводящего линейного объекта значительная часть тока захватывается линейным проводником, понижая плотности тока вблизи приемной линии (и соответственно величину кажущегося сопротивления). В случае непроводящего объекта с сечением много меньшим глубины его залегания эффект экранирования тока данным телом частично компенсируется эффектом просачивания тока под ним. Зависимость величины техногенной аномалии от качества и состояния антикоррозийного покрытия может служить одним из критериев оценки его состояния.

Б) Оценка влияния вертикальных линейных объектов (типа скважины) на результаты электрического зондирования

Для оценки влияния на результаты измерений поля вертикально расположенных подземных техногенных объектов (типа скважины, обсаженной металлической трубой) рассмотрим аналитический способ расчета электрического поля точечного источника в полупространстве с вертикальным линейным цилиндрическим включением [Колесников, Кутин и др., 2001].

Пусть источник тока A находится на поверхности однородной среды, имеющей сопротивление ρ_1 и содержащей включение в виде вертикально расположенного бесконечно длинного цилиндра радиуса a , с сопротивлением ρ_2 . Для расчета потенциала U введем цилиндрическую систему координат $\{r, \varphi, z\}$ с началом координат на поверхности ($z = 0$) и осью z , совпадающей с осью скважины. Расстояние от оси z до источника обозначим r_A , а расстояние от оси z до точки наблюдения — r_M . Решение будем искать на основе уравнения Лапласа (1.21):

$$\Delta U = 0, U = \begin{cases} U_1, r > a \\ U_2, r \leq a \end{cases}, \quad (2.18)$$

с использованием граничных условий на поверхности цилиндра:

$$U_1 = U_2, \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial r} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial r}. \quad (2.20)$$

Решение уравнения (2.18) в терминах Фурье-преобразования приводит к следующим выражениям:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} e_m \cos m\varphi \int_0^{\infty} A_m(\lambda) \cdot K_m(\lambda r) \cdot \cos(\lambda z) d\lambda \right\}, \quad (2.21)$$

$$U_2 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{R} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} e_m \cos m\varphi \int_0^{\infty} B_m(\lambda) \cdot I_m(\lambda r) \cdot \cos(\lambda z) d\lambda \right\}, \quad (2.22)$$

где $R = (r_M^2 + r_A^2 - 2r_M r_A \cos\varphi + z^2)^{1/2}$, φ — угол между линиями, соединяющими начало координат (ось скважины) с источником r_A , и с точкой, в которой определяется потенциал r_M ; $I_m(x)$, $K_m(x)$ — модифицированные функции Бесселя m -порядка, e_m — множитель, имеющий значение $e_0 = 1$ (при $m = 0$) и $e_m = 2$ для всех остальных членов ряда; $B_m(\lambda)$, $A_m(\lambda)$ — неизвестные функции, зависящие от параметров модели среды и переменной интегрирования λ .

Используя граничные условия (2.19)–(2.20) и выполнив ряд преобразований, получаем

$$A_m(\lambda) = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot I'_m(\lambda a) I_m(\lambda a) K_m(\lambda r_A)}{\rho_1 - (\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot K'_m(\lambda r_A) I_m(\lambda a)}; \quad (2.23)$$

$$B_m(\lambda) = \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot I'_m(\lambda a) K_m(\lambda a) K_m(\lambda r_A)}{\rho_1 - (\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot K'_m(\lambda a) I_m(\lambda a)}. \quad (2.24)$$

Подставив выражение (2.23) в уравнение (2.21) и полагая $z = 0$ (измерения потенциала на поверхности наблюдения), находим выражение потенциала для точек, расположенных вне линейного проводника ($r > a$):

$$U_{AM} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{(r_M^2 + r_A^2 - 2r_M r_A \cos\varphi_{AM})^{1/2}} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} e_m \cos m\varphi_{AM} \cdot F_m^A \right\}, \quad (2.25)$$

где

$$F_m^A = \int_0^{\infty} \frac{(\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot I'_m(\lambda a) J_m(\lambda a) K_m(\lambda r_0) K_m(\lambda r)}{\rho_1 - (\rho_2 - \rho_1) \cdot \lambda a \cdot K'_m(\lambda a) J_m(\lambda a)} d\lambda. \quad (2.26)$$

Формула для вычисления кажущегося сопротивления для четырехэлектродной симметричной установки, согласно (1.60) и (2.25), запишется в виде

$$\rho_k(r) = \frac{\pi AM \cdot AN}{MNI} \cdot \left(\frac{U_{AM}(r_M, \varphi_{AM}, 0) - U_{BM}(r_M, \varphi_{BM}, 0)}{-U_{AN}(r_N, \varphi_{AN}, 0) + U_{BN}(r_N, \varphi_{BN}, 0)} \right), \quad (2.27)$$

где

$$\varphi_{AM} = \text{Arccos} \frac{r_A^2 + r_M^2 - AM^2}{2r_A \cdot r_M}, \quad \varphi_{BM} = \text{Arccos} \frac{r_B^2 + r_M^2 - BM^2}{2r_B \cdot r_M},$$

$$\varphi_{AN} = \text{Arccos} \frac{r_A^2 + r_N^2 - AN^2}{2r_A \cdot r_N}, \quad \varphi_{BN} = \text{Arccos} \frac{r_B^2 + r_N^2 - BN^2}{2r_B \cdot r_N}.$$

Результаты численных расчетов для профильных наблюдений методом ВЭЗ четырехэлектродной установкой при максимальном полуразносе питающей линии 100 м и длине приемной линии MN , равной 1 м, приведенные в таблице 2.1, показывают, что при удалении (d) профиля наблюдений от скважины на расстояние более десяти метров максимальное отклонение кажущихся сопротивлений от фоновых значений (δ_{\max}) не превышает 4,8 %, что соизмеримо с погрешностью полевых наблюдений.

Т а б л и ц а 2. 1

$d, \text{ м}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\delta_{\max}, \%$	22,5	15,9	12,6	10,8	9,4	8,2	7,2	6,3	5,5	4,8	4,2	3,6	3,1	2,6	2,1

Расчеты выполнены при следующих параметрах модели: диаметр скважины брался равным 0,3 м, отношение сопротивления вмещающей

среды ρ_1 к сопротивлению скважины ρ_2 составляло 10^5 . Характер проявления аномального поля на разрезе кажущихся сопротивлений вдоль линии, пересекающей линейный вертикально расположенный объект, показан на рис. 2.9, а. Другой пример (рис. 2.9, б) показывает характер относительного отклонения кажущихся сопротивлений от фоновых значений при перемещении измерительной линии трехэлектродной установки АМН вблизи скважины.

Приемы снижения погрешностей исходных данных

Разработка способов и приемов снижения уровня погрешностей наблюдений является одним из элементов повышения однозначности решения обратной задачи.

Учитывая сложный, составной характер суммарной погрешности наблюдений, эффективность создаваемых способов во многом определяется учетом величины, характера поведения и природы составляющих ее компонент, выявляемых в процессе моделирования и проведения экспериментальных работ.

Рассмотрим ряд приемов снижения погрешностей исходных данных.

А) Нормализация наблюдаемых кривых кажущегося сопротивления

Одной из задач первичной обработки данных является минимизация влияния приповерхностных локальных неоднородностей, расположенных вблизи приемных электродов. Эти неоднородности, как было показано выше, способны завышать либо занижать измеренные при данном MN значения ρ_k на некоторую величину, определяемую электрическим сопротивлением неоднородности, ее размером и положением относительно приемных электродов, то есть приводить к квазиконформному (почти без изменения формы) смещению сегментов кривой зондирования, полученных при разных MN , и самих графиков $\rho_k(r)$, относительно друг друга вдоль оси сопротивлений. Величина такого смещения, как было показано выше, может достигать десятков процентов.

Не учет данного фактора, проявляющегося на разрезах кажущихся сопротивлений в виде зон относительно пониженного или повышенного сопротивления, пронизывающих весь разрез в исследуемом интервале глубин, может приводить к неверным геологическим толкованиям получаемых результатов, а также служить источником погрешностей

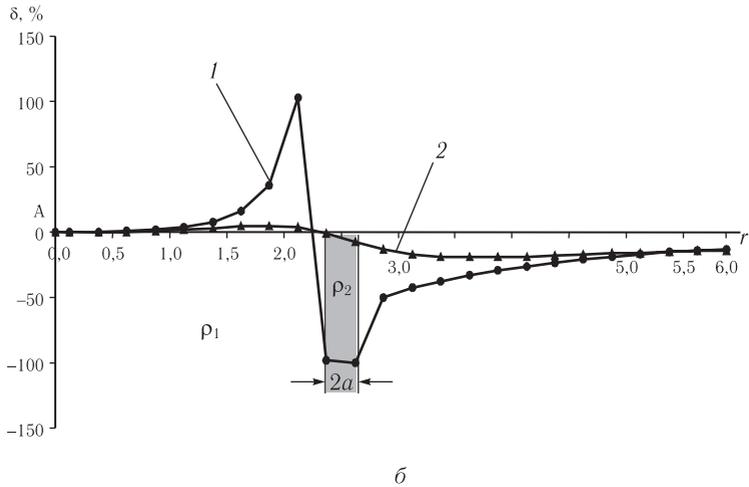
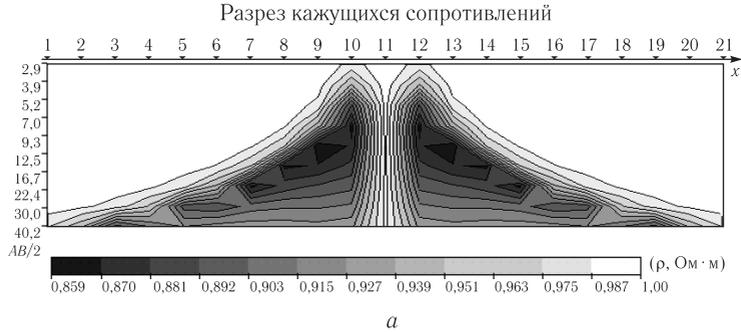
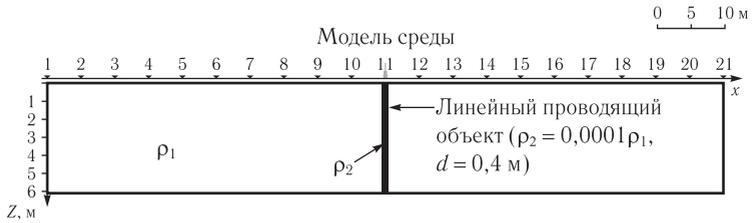


Рис. 2.9. Результаты численного моделирования электрических зондирований для модели вертикального проводящего объекта, находящегося в однородной среде (а) и графики относительного отклонения функции $\rho_s(r)$ от фоновых значений в зависимости от положения приемной линии трехэлектродной установкой AMN относительно скважины (б); $a = 0,15$ м; $\rho_1/\rho_2 = 10^5$. 1 — линия наблюдения пересекает скважину; 2 — линия наблюдения удалена от скважины на расстояние 1 м

определения сопротивлений слоев разреза и связанных с ним обобщенных параметров слоистой толщи (суммарной продольной проводимости S , суммарного поперечного сопротивления и т. п.).

Процесс приведения кривых $\rho_k(r)$, полученных при разных условиях заземлений MN , к некоторому фоновому уровню, наиболее свободному от влияния локальных объектов, расположенных вблизи MN , будем называть *нормализацией* наблюдаемых кривых зондирования.

Поскольку задача выбора такого фонового уровня обычно недоопределена, ввиду отсутствия информации о латеральной изменчивости свойств вмещающей среды, для приближенной оценки возможного влияния этих приповерхностных неоднородностей могут быть привлечены вспомогательные интерпретационные параметры: горизонтальные производные $\rho_k(r)$, подчеркивающих латеральную изменчивость свойств среды, величина и характер перекрытий отрезков кривых, полученных при разных MN , косвенно отображающие степень влияния неоднородностей среды (см. раздел. 2.5). Признаками влияния локальных приповерхностных неоднородностей согласно результатам моделирования, в частности, приведенным на рис. 2.8, может служить и то, что аномалии, вызванные ими, как правило, имеют локальный характер, проявляющийся в наблюдаемом поле ρ_k (разрезах, объемных отображениях) в виде узких «столбобразных», пронизывающих весь разрез аномалий, отмечаемых, как правило, на одиночных точках зондирования. Это позволяет рассматривать данные выскоки как случайный фактор при определении фонового уровня и применять для его минимизации соответствующие приемы — например, робастные методы сглаживания (медианную фильтрацию и т. п.).

Природа и характер образования перекрытий указывают на то, что устранение разрывов между отрезками наблюдаемой кривой $\rho_k(r)$, полученными при разных MN , должно выполняться путем параллельного смещения их вдоль оси сопротивлений. При выборе уровня приведения этих отрезков (и самих графиков зондирования) предпочтение, по-видимому, должно отдаваться участкам кривой, полученным при наибольшей длине приемной линии, при которой величина ρ_{MN} соответствует наибольшему объему пород и потому позволяет получать более устойчивые фоновые значения сопротивлений по сравнению с участками кривой для малых MN , где вероятность выскока, в этом смысле, больше.

В случае относительно выдержанных по простиранию фоновых значений приповерхностной части разреза для снижения погрешностей, связанных с наличием локальных объектов вблизи MN (P -эффекта),

может быть использована процедура нормализации кривых $\rho_k(r)$ — приведения их к единому фоновому уровню, в качестве которого может быть использовано, к примеру, среднее геометрическое всех измеренных значений $\rho_k(r)$ по профилю (или по площади).

Нормализованные кривые электрического зондирования $\rho_k(r)$ в этом случае могут быть определены по формуле

$$\rho_{k_{ij}}(r) = C_i \rho_{k_{ij}}(r); \quad i = 1, L; \quad j = 1, n, \quad (2.28)$$

где L — число точек зондирования на профиле (или площади); n — число разносов измерительной установки, C_i — нормировочные коэффициенты, определяемые путем минимизации следующего функционала

$$\begin{aligned} \Phi(C_1, \dots, C_n) &= \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n \ln \left[\frac{C_i \rho_{k_{ij}}(r)}{\sqrt[nL]{\prod_{i,j} \rho_{k_{ij}}(r)}} \right]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n \left[\ln C_i + \ln \rho_{k_{ij}}(r) - \frac{1}{nL} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n \ln \rho_{k_{ij}}(r) \right]^2. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Применяя метод наименьших квадратов, получаем:

$$\ln C_i = \bar{C}_i = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln \rho_{k_{ij}}(r) + \frac{1}{nL} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^n \ln \rho_{k_{ij}}(r), \quad (2.30)$$

отсюда: $C_i = e^{\bar{C}_i}$.

Один из примеров практического применения данного способа приведен на рис. 2.10 (см. вклейку). Наблюдаемое поле, представленное в виде разреза кажущихся сопротивлений, отмечает заметное влияние приповерхностных неоднородностей, проявляющееся в повышенной изрезанности поведения изолиний и наличии столбообразных аномалий на разрезе горизонтальной производной $\rho_k(r)$ (рис. 2.10, а, б). Результаты обработки в виде графика нормировочного коэффициента $C(x)$, (рис. 2.10, в) показывают степень влияния приповерхностных неоднородностей вдоль профиля наблюдений.

Разрез кажущихся сопротивлений, полученный в результате применения процедуры нормирования графиков зондирования (рис. 2.10, г), отмечает закономерное, пространственно выдержанное, отображение

электрических свойств среды, характерное для интегральных методов исследования и обеспечивающее более благоприятные условия для последующей обработки и количественной интерпретации результатов зондирования.

Величина и характер перекрытий отрезков кривой, в силу своей природы могут использоваться в качестве одного из поисковых признаков при трассировании линейно вытянутых объектов.

Б) Регуляризация исходной информации

Наличие целого ряда неконтролируемых по характеру поведения погрешностей, связанных с методическими, аппаратными, геологическими и модельными факторами, требуют разработки специальных приемов предынтерпретационной регуляризации — выделения регулярной части наблюдаемого поля на фоне помех, наиболее адекватно отображающей интересующую часть геологического разреза.

Использование для этой цели обычных способов сглаживания одиноких графиков зондирования не дает желаемых результатов, поскольку эти способы, как правило, не имеют меры сглаживания. Очевидно, что для создания оптимальных приемов сглаживания необходимо привлечение дополнительной информации об искомой кривой. В качестве такой информации могут быть использованы, к примеру: а) общность определенной части разреза для соседних зондирований; б) гладкость функции $\rho(r)$; в) величина погрешности измерений, оцениваемая при полевых наблюдениях путем постановки контрольных ВЭЗ; г) известные сведения о геоэлектрическом разрезе в форме типичной синтетической кривой ВЭЗ, рассчитанной по данным электрического каротажа и др.

Примером математической реализации выделения регулярной части кривой зондирования с учетом дополнительной информации может служить минимизация следующего функционала [Колесников, 1981]:

$$\Phi[\bar{\rho}^\alpha, \alpha] = \int_0^\infty \left[(\bar{\rho} - \bar{\rho}^{(u)})^2 + q_1 (\bar{\rho} - \bar{\rho}^{(1)})^2 + \dots + q_i (\bar{\rho} - \bar{\rho}^{(i)})^2 + \dots + \alpha \left(\frac{\partial^2 \bar{\rho}}{\partial r^2} \right) \right] d\bar{r}, \quad (2.31)$$

где $\bar{\rho} = \ln \rho_k(\bar{r})$ — искомая функция; $\bar{r} = \ln r$; $\bar{\rho}^{(u)} = \ln \rho_k^{(u)}(r)$ — регуляризуемая функция; $\bar{\rho}^{(i)} = \ln \rho_k^{(i)}(\bar{r})$ — функции кажущегося сопротивления в соседних к регуляризуемой точках зондирования; измеренной;

$i = 1, 2, \dots, L$; L — количество отобранных соседних точек зондирования; α — параметр регуляризации; q_i — коэффициенты, характеризующие близость и степень подобия каждой i -й функции $\rho_k(r)$ к регуляризируемой.

Минимизация функционала (2.31) является задачей вариационного исчисления. Ее решение находится с помощью уравнения Эйлера, которое в данном случае после некоторых простых преобразований приводит к уравнению

$$\bar{\rho}'' - A\bar{\rho} = B(r) \quad (2.32)$$

где

$$A = \frac{1}{\alpha} \left(1 + \sum_{i=1}^L q_i \right); \quad B = -\frac{1}{\alpha} \left(\bar{\rho}'' + \sum_{i=1}^L q_i \bar{\rho}^{(i)} \right).$$

Общее решение этого уравнения при краевых условиях

$$\bar{\rho}(r_0) = \frac{\bar{\rho}''(r_0) + \sum_{i=1}^L q_i \bar{\rho}^{(i)}(r_0)}{1 + \sum_{i=1}^L q_i}, \quad \bar{\rho}(r_N) = \frac{\bar{\rho}''(r_N) + \sum_{i=1}^L q_i \bar{\rho}^{(i)}(r_N)}{1 + \sum_{i=1}^L q_i}$$

имеет следующий вид

$$\begin{aligned} \bar{\rho}(\bar{r}_0) = & \frac{1}{2A} \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}} \left(e^{A(\bar{r}-\xi)} - e^{-A(\bar{r}-\xi)} \right) B(\xi) d\xi + \\ & + \bar{\rho}(\bar{r}_0) \frac{e^{A(\bar{r}-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}-\bar{r}_0)}}{e^{A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)}} + \bar{\rho}(\bar{r}_N) \frac{e^{-A(\bar{r}-\bar{r}_0)} - e^{A(\bar{r}-\bar{r}_0)}}{e^{A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)}} + \\ & + \frac{e^{A\bar{r}_N}}{2A} \frac{e^{-A(\bar{r}-\bar{r}_0)} - e^{A(\bar{r}-\bar{r}_0)}}{e^{A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)}} \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}_N} e^{-A\xi} B(\xi) d\xi + \\ & + \frac{e^{-A\bar{r}_N}}{2A} \frac{e^{A(\bar{r}-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}-\bar{r}_0)}}{e^{A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)} - e^{-A(\bar{r}_N-\bar{r}_0)}} \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}_N} e^{A\xi} B(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Меняя α на сетке значений

$$\alpha_s = m\alpha_{s-1}, \quad s = 1, 2, \dots; \quad \alpha_0 = 1; \quad m < 1$$

с помощью уравнения (2.33) получаем варианты сглаженной кривой зондирования.

Критерием выбора оптимального варианта может служить условие:

$$\frac{1}{N+1} \sum_{j=0}^N \left| \frac{\rho_k^a(r_j) - \rho_k^0(r_j)}{\rho_k^0(r_j)} \right| = \delta / \sqrt{L},$$

где

$$\rho_k(r_j) = \frac{\sum_{i=0}^L q_i \rho_k(r)}{\sum_{i=0}^L q_i};$$

δ — погрешность измерения $\rho_k(r)$.

Опробование способа на ряде теоретических и практических примеров показало, что в основном регуляризация улучшает решение. Однако используемые для этой цели приемы, несмотря на всю сложность их реализации, не позволяют распознать и полностью подавить различные виды помех, а лишь несколько снижают их уровень, не решая принципиально проблемы некорректности обратной задачи. Недостаточно высокая эффективность их применения определяется низкой информативностью используемой дополнительной информации, проявляющейся в неопределенности выбора необходимого количества соседних зондирований и весовых коэффициентов q_i . Наиболее эффективным в этом плане являются приемы изучения влияния различных мешающих факторов, основанные на использовании методов численного моделирования.

2.5. Основы качественной интерпретации

Качественная интерпретация широко используется на практике при истолковании результатов электрического зондирования. Суть ее заключается в получении начального представления о пространственном изменении электрических свойств исследуемой среды непосредственно по результатам полевых наблюдений.

В основе качественной интерпретации лежат два основных положения, вытекающих из теории электрического зондирования — зависимость эффективной глубины проникновения электрического тока от разности измерительной установки и связь характера поведения кривой зондирования с изменением истинных электрических сопротивлений пород с глубиной (см. разделы 1.3, 1.4, 1.7).

Соотношение между зондирующим параметром (разностью установки) и глубиной зондирования можно условно представить в виде

$$Z = \alpha \cdot r, \quad (2.34)$$

где Z — эффективная глубина зондирования; $\alpha = \alpha(x, y, z)$ — величина, зависящая от соотношения электрических параметров среды и вида измерительной установки. Как было показано в разделе 1.3, в случае однородных и слабоконтрастных по сопротивлению разрезов, величина α составляет порядка $0,5r-0,7r$. В случае неоднородных сред с повышенной контрастностью свойств эта величина может меняться в значительно более широких пределах.

Рассмотрим физический смысл эффективных параметров, используемых при качественной интерпретации, на основе асимптотических соотношений функции $\rho_k(r)$.

Кривую зондирования в первом приближении можно рассматривать как совокупность асимптотических участков, на каждом из которых функция $\rho_k(r)$ последовательно стремится к сопротивлению очередного по глубине слоя, определяемого эффективной глубиной проникновения электрического тока. Ее значения тем ближе к истинному сопротивлению, чем больше область эффективного проявления слоя на кривой зондирования (чем больше его относительная мощность и, соответственно, меньше влияние последующих слоев). Для последнего слоя, мощность которого полагается бесконечно большой ($h_n = \infty$), при определенном увеличении разноса установки функция $\rho_k(r)$ достигает истинного значения его сопротивления $\lim_{r \rightarrow \infty} \rho_k(r) = \rho_n$, (см. раздел 1.7). Из асимптотических соотношений вытекает также, что и для первого слоя $\lim_{r \rightarrow 0} \rho_k(r) = \rho_1$. В соответствии с этим функция $\rho_k(r)$ отображает характер изменения истинного сопротивления в исследуемом интервале глубин, а объемные отображения поля $\rho_k(r)$ и его сечения в виде разрезов и карт — пространственное изменение электрических сопротивлений.

Учитывая существующую связь асимптотических значений кажущегося сопротивления $\rho_k(r)$ с истинными значениями сопротивления определенной части разреза (1.137), (1.143), можно ввести понятие эффективного сопротивления $\rho_{ac}(r)$ как приближенного асимптотического значения сопротивления некоторой части разреза, соответствующей данному разносу r . В простейшем случае, когда каждый из асимптотических отрезков многослойной кривой зондирования условно отождествляется с влиянием двухслойного элемента разреза, формула асимптотического приближения для двухслойной среды, связывающая наблюдаемые значения кривой кажущегося сопротивления в асимптотической области с $\rho_{ac}(r)$ (1.137), (1.143), приводит к следующим соотношениям:

$$\rho_{ac}(r_j) \approx \begin{cases} \frac{\Delta r_j}{\Delta S_{kj}}, & (\rho_k(r_j) < \rho_k(r_{j+1})); \\ \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j}, & (\rho_k(r_j) > \rho_k(r_{j+1})). \end{cases} \quad (2.35)$$

где $\Delta r_j = r_{j+1} - r_j$; $\Delta S_{kj} = \frac{r_{j+1}}{\rho_k(r_{j+1})} - \frac{r_j}{\rho_k(r_j)}$; $\Delta T_{kj} = r_{j+1}\rho_k(r_{j+1}) - r_j\rho_k(r_j)$.

В случае последнего слоя ($h_n = \infty$) функция $\rho_k(r)$ при $r \rightarrow \infty$ стремится к истинному сопротивлению последнего слоя, поэтому и $\rho_{ac}(r) \rightarrow \rho_n$.

Для левой асимптоты (область малых разносов установки) функция $\rho_k(r)$ при $r \rightarrow 0$ стремится к значению сопротивления первого слоя и соответственно $\lim_{r \rightarrow 0} \rho_{ac}(r) \rightarrow \rho_1$.

Можно отметить, что соотношения (2.35) по внешнему виду являются как бы аналогами истинных значений сопротивлений, вычисляемых по известным формулам $\rho_i = \frac{h_i}{S_i}$ и $\rho_i = \frac{T_i}{h_i}$. Однако, учитывая недос-

таточно удовлетворительную точность асимптотического соотношения (2.35) для случая нисходящей ветви кривой зондирования, отмеченную в п. 1.7, для получения более приемлемых результатов может быть использовано следующее приближенное соотношение:

$$\rho_{ac}(r) = r_k(r) + \gamma \Delta r_k(r), \quad \rho_{i+1} < \rho_i,$$

где γ — безразмерный коэффициент, играющий роль регулятора дифференцируемости кривой ($1 \leq \gamma < 2$).

Таким образом, величина $\rho_{ac}(r)$, вычисляемая по формуле (2.35), является асимптотическим приближением к истинному сопротивлению слоя, залегающему на эффективной глубине зондирования, определяемой разносом установки r . По своим значениям она занимает промежуточное положение между значениями кажущегося и истинного сопротивлений, приближаясь к истинному сопротивлению по мере увеличения области эффективного проявления слоя на кривой зондирования. Характер поведения данной функции $\rho_{ac}(r)$, в сравнении с наблюдаемым графиком $\rho_k(r)$ и истинным изменением сопротивления с глубиной, показан на рис. 2.11, а.

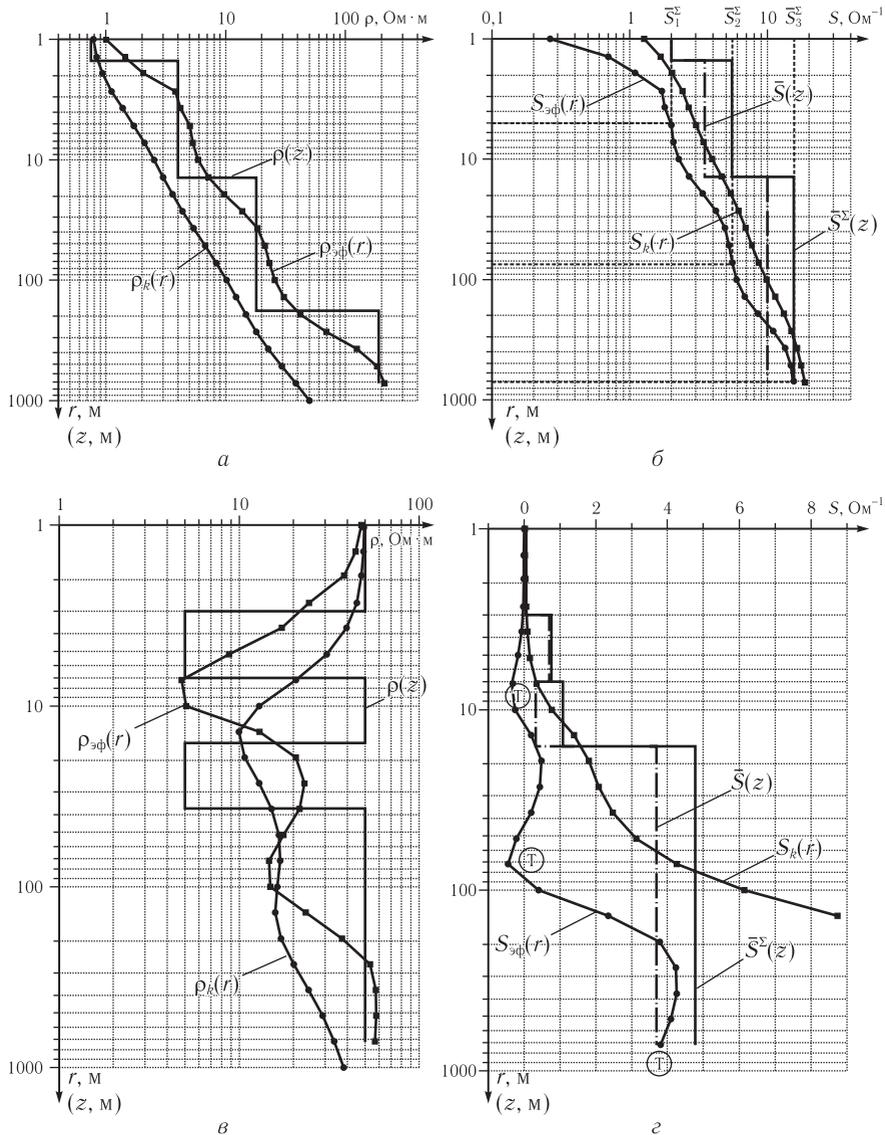


Рис. 2.11. Графики эффективных параметров для одинакового (*a*, *б*) и смешанного (*в*, *г*) типов разреза

Аналогичным образом, воспользовавшись формулами (1.138), (1.144), с учетом (2.35), можно ввести понятия эффективных значений продольной проводимости $S_{\text{эф}}$ и поперечного сопротивления $T_{\text{эф}}$:

$$S_{\text{эф},i}(r_j) \approx r_j \left(\frac{1}{\rho_k(r_j)} - \frac{1}{\rho_{i+1}} \right) \approx r_j \left(\frac{1}{\rho_k(r_j)} - \frac{\Delta S_{kj}}{\Delta r_j} \right); \quad (2.36)$$

$$(\rho_k(r_{j+1}) > \rho_k(r_j)).$$

$$T_{\text{эф},i}(r_j) \approx r_j (\rho_k(r_j) - \rho_{i+1}) \approx r_j \left(\rho_k(r_j) - \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j} \right); \quad (2.37)$$

$$(\rho_k(r_{j+1}) < \rho_k(r_j)).$$

При относительно больших значениях ρ_{i+1} ($\rho_{i+1} \rightarrow \infty$) вторым слагаемым в скобках формулы (2.36) можно пренебречь, и значения $S_{\text{эф}}(r)$ становятся равными кажущейся продольной проводимости:

$$S_{\text{эф}}(r_j) \approx \frac{r_j}{\rho_k(r_j)} = S_k(r_j); \quad (\rho_k(r_{j+1}) > \rho_k(r_j)), \quad (2.38)$$

а при относительно малых значениях ρ_{i+1} ($\rho_{i+1} \rightarrow 0$) формула (2.37) соответственно запишется в виде

$$T_{\text{эф}}(r_j) \approx r_j \rho_k(r_j) = T_k(r_j); \quad (\rho_k(r_{j+1}) < \rho_k(r_j)). \quad (2.39)$$

То есть, параметры кажущейся продольной проводимости и кажущегося поперечного сопротивления наиболее близки к их истинным значениям лишь в случае предельных либо достаточно контрастных по сопротивлению значений сопротивления подстилающего слоя. Сопоставление графиков этих параметров с истинным изменением продольной проводимости с глубиной для разного типа разрезов показано на рис. 2.11 б, г.

Формулы (2.35)–(2.39), вследствие двухслойной аппроксимации асимптотических отрезков многослойной кривой, носят приближенный характер, позволяющий говорить лишь об оценочных значениях вычисляемых величин. Степень этого приближения зависит от влияния соседних слоев разреза. Попробуем выполнить уточнение этих формул, отождествляя каждый из асимптотических отрезков многослойной кривой зондирования с влиянием трехслойного элемента разреза, учитывающего влияние соседних слоев. Оценим влияние предыдущего слоя. Формулы асимптотического приближе-

ния для трехслойной среды приводят к следующим соотношениям для $\rho_{ac}(r)$ в диапазоне эффективного проявления $(i + 1)$ -го слоя:

$$\rho_{ac}(r_j) \approx \begin{cases} \frac{\Delta r_j}{\Delta S_{kj}}, & (\rho_{i-1} < \rho_i < \rho_{i+1}); \\ \frac{\Delta T_{kj}}{\Delta r_j}, & (\rho_{i-1} > \rho_i > \rho_{i+1}); \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\rho_{ac}(r_j) \approx \begin{cases} \frac{\Delta r_j}{\Delta F_{ji}}, & (\rho_{i-1} > \rho_i < \rho_{i+1}); \\ \frac{\Delta F_{ji}^*}{\Delta r_j}, & (\rho_{i-1} < \rho_i > \rho_{i+1}), \end{cases} \quad (2.41)$$

где

$$\Delta F_{ji} = \frac{r_{j+1}}{\rho_k(r_{j+1}) - T_{\text{эф}}(r_j)/r_{j+1}} - \frac{r_j}{\rho_k(r_j) - T_{\text{эф}}(r_{j-1})/r_j};$$

$$\Delta F_{ji}^* = \frac{r_{j+1}}{(1/\rho_k(r_{j+1})) - S_{\text{эф}}(r_j)/r_{j+1}} - \frac{r_j}{(1/\rho_k(r_j)) - S_{\text{эф}}(r_{j-1})/r_j}.$$

Поскольку значения эффективных параметров в общем случае определяются типом разреза, для удобства назовем двухслойный элемент разреза, соответствующий $\rho_i < \rho_{i+1}$, S -элементом, а в случае $\rho_i > \rho_{i+1}$ — T -элементом. Из формул (2.35)–(2.41) следует, что для разреза, состоящего из элементов одного типа, общий вид формулы эффективного параметра не зависит от числа слоев, а определяется лишь разномом установки, в то время как в случае смешанного типа разреза формула несколько усложняется за счет влияния обоих элементов. В приведенных двух последних формулах в качестве параметров, характеризующих влияние предыдущего $(i-1)$ -го слоя, вместо T_{i-1} и S_{i-1} взяты эффективные их аналоги $T_{\text{эф}}(r_i)$, $T_{\text{эф}}(r_{i-1})$ и $S_{\text{эф}}(r_i)$, $S_{\text{эф}}(r_{i-1})$.

Графики значений $\rho_{ac}(r)$ для разного типа разрезов, приведенные на рис. 2.11, в, показывают, что по характеру поведения и по своим значениям они более близки к истинному сопротивлению среды по сравнению с графиком $\rho_k(r)$.

Более сложным для смешанного типа разреза является учет влияния последующих слоев на величину эффективного сопротивления. Согласно (1.101), это влияние можно представить соотношением

$$\rho_{ac}(r) = \rho_i / R_i(m),$$

где ρ_i — истинное сопротивление i -го слоя; $R_i(m)$ — функция, содержащая влияние последующих слоев разреза в диапазоне эффективного влияния i -го слоя. Количественная оценка данной величины на этапе предварительного анализа затруднительна. Можно лишь отметить, что поскольку это влияние проявляется в отклонении функции $R_i(m)$ от единицы либо в большую ($\rho_{i+1} > \rho_i$), либо в меньшую ($\rho_{i+1} < \rho_i$) сторону, величина $\rho_{ac}(r)$ может быть как больше, так и меньше истинного значения сопротивления слоя.

Таким образом, поскольку каждая отдельно взятая кривая ВЭЗ дает представление об изменении электрических параметров разреза с глубиной в точке зондирования, визуализация результатов зондирования, полученных при профильных либо площадных наблюдениях с помощью различных графиков, разрезов, карт, объемных отображений наблюдаемых величин и их трансформант, позволяет получать информацию о пространственном распределении электрических сопротивлений исследуемой среды, проследивать те или иные особенности разреза, выявлять наличие аномальных зон.

К настоящему времени в арсенале электроразведки накоплен достаточно большой объем различных качественных параметров, а также приемов и способов обработки первичного материала. Рассмотрим основные из них и попытаемся уяснить их физическое содержание и возможности практического применения, исходя из вышерассмотренного материала.

По характеру анализа геоэлектрического разреза можно выделить три основные группы способов качественной интерпретации.

1. Способы, раскрывающие общее качественное представление о геоэлектрическом разрезе в целом как по площади, так и на разных эффективных глубинах (разрезы, карты, объемные отображения поля кажущихся сопротивлений, кажущихся проводимостей, карты типов кривых и др.).

2. Способы, основанные на прослеживании и анализе отдельных частей геоэлектрического разреза по характерным точкам и участкам наблюдаемых кривых ВЭЗ (графики и карты абсцисс и ординат экстремальных точек $\rho_k(r)$, максимальных градиентов асимптотических ветвей кривых зондирования, карт суммарной продольной проводимости и т. п.).

3. Способы, основанные на использовании различных дифференциальных и интегральных трансформант, нацеленных либо на повышение

разрешающей способности (разрезы дифференциальных кажущихся сопротивлений, нормированных производных, полного нормированного градиента и т. п.), либо на выделение интегральной части поля в условиях повышенного уровня помех (графики и разрезы кумулятивных значений кажущегося сопротивления, кажущейся проводимости и т. п.).

Способы первой группы наиболее широко применяются в практике интерпретации электроразведочных данных. Визуализация и истолкование получаемых с их помощью разрезов, карт, объемных отображений основаны на аналогии между истинными и эффективными параметрами среды. В качестве эффективных параметров помимо кажущегося сопротивления, используются и связанные с ним другие характеристики, например, кажущаяся продольная проводимость $S_k = r/\rho_k$ (аналог истинной продольной проводимости $S = Z/\rho$), кажущееся поперечное сопротивление $T_k = r \cdot \rho$ (аналог истинного поперечного сопротивления $T = h \cdot \rho$) и т. п.

Визуализация поля эффективных параметров выполняется в основном с помощью приемов построения изолиний и цветовой заливки интервалов между ними с помощью палитры цветов, выбираемой в соответствии с их числовыми значениями. Иногда при визуализации разрезов кажущихся проводимостей $S_k = r/\rho_k$ для подчеркивания структурных особенностей разреза используют построение этих разрезов в виде совокупности графиков S_k для каждого из разносов питающей линии (Матвеев, 1961), отображающих изменение продольной проводимости вдоль заданного профиля. При этом поскольку приращение проводимостей для соседних разносов, связанное с величиной эффективной мощности, уменьшается с увеличением сопротивления нижележащего слоя, сгущение линий S_k соответствует положению пластов высокого сопротивления, а их разрежение — положению пластов пониженного сопротивления. Пересечение линий S_k свидетельствует о наличии значительных горизонтальных неоднородностей среды.

С помощью способов второй группы подчеркиваются и прослеживаются отдельные особенности геоэлектрического разреза, которые не всегда достаточно четко проявляются на разрезах ρ_k , S_k и др. Выбор для интерпретации тех или иных параметров этой группы определяется как строением изучаемого района, так и характером поставленных перед зондированием задач, и часто осуществляется на основе анализа разрезов первой группы. Результаты представляются в виде графиков, разрезов и карт изменения того или иного параметра. Их физическое толкование то же, что и в случае первой группы способов. К этой группе можно отнести

и визуализацию ряда дополнительных параметров, характеризующих геоэлектрические особенности разреза и качество первичного материала, к примеру, углов наклона асимптотических ветвей кривых зондирования, величины перекрытий сегментов кривых $\rho_k(r)$, полученных при разной длине приемной линии, обобщенных геоэлектрических параметров, определяемых по асимптотическим участкам этих кривых и т. п.

Способы третьей группы нацелены на выделение скрытой или неявно выраженной полезной информации, содержащейся в кривой $\rho_k(r)$, необходимое при выявлении сравнительно небольших подземных объектов (карстовых полостей, локальных тел и т. п.), повышении контрастности отображения тех или иных особенностей разреза.

Для этой цели в электроразведке предложен целый ряд различных дифференциальных и интегральных трансформант графиков кажущегося сопротивления — их вертикальных и горизонтальных производных, нормированных производных, полного нормированного градиента, соотношений типа $\Delta r / \Delta S_k$, $\Delta T_k / \Delta r$ и т. п. [Матвеев, 1974; Колесников, 1981, Хмелевской, Шевнин и др. 1988, и др.].

Рассмотрим некоторые из них. Начнем с так называемых вертикальных и горизонтальных производных кажущегося сопротивления:

$$\Delta_x \rho_k(r, x_i) = \frac{\ln \rho_k(r, x_{i+1}) - \ln \rho_k(r, x_i)}{x_{i+1} - x_i}; \quad (2.42)$$

$$\Delta_r \rho_k(r_j, x) = \frac{\ln \rho_k(r_{j+1}, x) - \ln \rho_k(r_j, x)}{\ln r_{j+1} - \ln r_j}, \quad (2.43)$$

где x — координата точки зондирования на профиле, r — разнос установки.

Данные характеристики по своей сути не несут какой-либо особой физической содержательности, кроме той, которая заложена в сам процесс дифференцирования, то есть, отображают скорость изменения функции кажущегося сопротивления относительно изменения аргумента (в данном случае — расстояния до точки зондирования либо разноса установки). Однако использование данного математического приема позволяет повысить степень дифференцируемости наблюдаемого графика кажущегося сопротивления и подчеркнуть некоторые особенности разреза. Так, применение горизонтальной производной $\Delta_x \rho_k(x, r)$ позволяет в более явном виде охарактеризовать латеральную изменчивость свойств среды и отобразить наличие приповерхностных локальных неоднородностей

(см. раздел. 1.4), а вертикальная производная $\Delta_r \rho_k(x, r)$ позволяет более отчетливо отобразить степень изменчивости свойств разреза с глубиной. Величина ее, характеризующая приращение функции $\rho_k(r)$ по r , не зависит от положением кривой зондирования относительно оси сопротивлений, поэтому она в значительной мере свободна от влияния P -эффекта, связанного с наличием приповерхностных неоднородностей вблизи приемной линии. Примеры построения разрезов производных кажущегося сопротивления показаны на рис. 2.12, б, в (см. вклейку).

Вместе с тем, наряду с отмеченными особенностями рассмотренных дифференциальных трансформант, подчеркивающих степень изменчивости свойств разреза, имеются и некоторые негативные моменты, затрудняющие их истолкование, в частности, связанные с появлением при визуализации дополнительных аномалий иногда противоположного знака, являющихся результатом процесса дифференцирования.

Среди других дифференциальных трансформант функции $\rho_k(r)$ можно отметить полные нормированные производные кажущегося сопротивления [Зарипова, Киричек и др., 1971, 1980]. Основная идея получения данного параметра заключается в определении отклонений значений кажущегося сопротивления от некоторого фона, в качестве которого берутся средние значения кажущихся сопротивлений по профилю (или площади) для каждого из разносов установки, и усиления этих отклонений с помощью процесса дифференцирования.

Вычисление полных нормированных производных кажущегося сопротивления осуществляется по формуле:

$$\varepsilon_{ij} = \delta_{ij} - \delta_{jmin}, \quad (2.44)$$

где

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= \Delta_{ij} - \Delta_{i(j-1)}; \\ \Delta_{ij} &= \frac{\rho_{kij} - \rho_{kcpj}}{\rho_{kcpj}} \cdot 100\%; \\ \Delta_{i(j-1)} &= \frac{\rho_{ki(j-1)} - \rho_{kcp(j-1)}}{\rho_{kcp(j-1)}} \cdot 100\%; \\ \rho_{kcpj} &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \rho_{kij}; \end{aligned}$$

$$\rho_{kcp(j-1)} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \rho_{ki(j-1)},$$

j — порядковый номер разноса; i — порядковый номер точки ВЭЗ; L — количество ВЭЗ на профиле; $\delta_{j\min}$ — наименьшее значение нормированной разности для j -го разноса.

Осмысление разрезов нормированных производных связано как с отмеченными выше общими для дифференциальных параметров особенностями, так и с выбором условий, обеспечивающих оптимальное соотношение между фоновой и аномальной составляющими поля.

При анализе разрезов нормированных производных и в целом параметров этой группы следует иметь в виду, что процесс дифференцирования функции, осложненной погрешностями, может приводить к появлению ложных аномалий. Для получения более достоверных результатов необходимо применение специальных способов оптимального сглаживания кривых зондирования, в частности, рассмотренных в разделе 2.4.

Среди дифференциальных трансформант, предлагаемых для локализации аномалиеобразующих объектов, можно отметить возможность использования значений полного нормированного градиента [Березкин, 1998]:

$$G_n = \frac{\sqrt{(\Delta_x \rho_k^2(r, x) + \Delta_r \rho_k^2(r, x))_i^v}}{\frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} \sqrt{(\Delta_x \rho_k^2(r, x) + \Delta_r \rho_k^2(r, x))_i^v}}, \quad (2.45)$$

где L — число точек зондирования на профиле; $\Delta_x \rho_k(r, x)$, $\Delta_r \rho_k(r, x)$ — горизонтальная и вертикальная производные функции $\rho_k(r)$; v — показатель, влияющий на четкость проявления аномалии (подбирается для конкретной ситуации: $v = 1, 2, 3, \dots$).

В отличие от дифференциальных трансформант типа (2.42)–(2.44) данный параметр G_n , как показывают результаты численного моделирования [Березкин, 1998], не связан с появлением дополнительных аномалий, чем обеспечивает более благоприятные условия для локализации аномальных объектов (рис. 2.12, ε).

В ряде случаев, например, при выделении общих закономерностей изменения свойств среды при высоком уровне помех, полезно использование и интегральных трансформант кривой $\rho_k(r)$ (Хмелевской, Шевнин и др. 1988):

$$S_{kj} = \int_{r_0}^{r_j} dS_k = \int_{r_0}^{r_j} \frac{dr}{\rho_k(r)}; \quad (2.46)$$

$$T_{kj} = \int_{r_0}^{r_j} dT_k = \int_{r_0}^{r_j} \rho_k(r) dr. \quad (2.47)$$

Получаемые с помощью формул (2.46), (2.47) значения имеют смысл соответственно суммарной кажущейся продольной проводимости и суммарного кажущегося поперечного сопротивления толщи пород от поверхности наблюдений до эффективной глубины зондирования, определяемой разносом установки. Однако, как было показано выше, применение этих формул ограничено типом геоэлектрического разреза.

Помимо рассмотренных выше трансформант, в рамках данной группы способов выделяется ряд дифференциальных эффективных параметров, основанных на аналогии с соответствующими истинным параметрами среды, в частности, $\rho_s = \Delta r / \Delta S_k$ (по аналогии с $\rho = \Delta Z / \Delta S$); $\rho_T = \Delta T_k / \Delta r$ (по аналогии с $\rho = \Delta T / \Delta Z$). В соответствии с (2.35) эти параметры имеют смысл эффективного сопротивления, равно приближенному асимптотическому значению удельного сопротивления среды, отвечающего эффективной глубине зондирования при данном разносе установки.

Таким образом, рассмотрев различные качественные параметры, можно отметить, что качественная интерпретация дает возможность получения достаточно полной предварительной информации о геоэлектрическом разрезе, включая сведения об истинном сопротивлении первого и последнего слоя, обобщенных параметрах надпорной толщи, характере пространственного изменения электрических сопротивлений, сведения о качестве первичного материала и степени влияния неоднородностей среды. При решении ряда поисково-разведочных, инженерно-геологических и другого вида задач по результатам качественной интерпретации можно получить необходимую, а иногда и вполне достаточную информацию об изучаемых объектах. Применение качественной интерпретации привлекает рядом ее достоинств — устойчивостью эффективных параметров к малым изменениям исходных данных, оперативностью анализа, простотой и экономичностью вычислительных схем и др. Вместе с тем, можно отметить, что возможности ее еще далеко не исчерпаны. Совершенствование и развитие этих способов связано с поисками как эвристических, так и приближенных теоретических соотношений между наблюдаемыми значениями и истинными параметрами среды.

2.6. Способы количественной интерпретации

Количественная интерпретация относится к одному из наиболее сложных и проблемных этапов истолкования электроразведочных материалов, так как помимо задачи математической инверсии наблюдаемых данных в параметры модели среды она затрагивает решение таких принципиально важных вопросов как обеспечение необходимой устойчивости и достоверности решений в условиях некорректности обратной задачи, выбор интерпретационной модели в рамках информативности метода, учет влияния разного рода помех и др. В общем случае она включает два основных этапа — физическую интерпретацию, в результате которой определяются численные значения физических параметров модели среды, и геологическую, осуществляющую переход от физических параметров к геологическим характеристикам разреза.

В условиях практической неединственности обратной задачи, как было показано выше (разделы 2.1–2.3), реализация количественной интерпретации электрических зондирований требует учета ряда моментов, отражающих особенности данного метода: а) выделение оптимального числа обобщенных слоев в разрезе; б) определение соответствия между реальными пачками пород и обобщенными геоэлектрическими слоями, выделенными по данным интерпретации; в) оценку неопределенности задачи, анализ причин, которыми она обусловлена, выбор дополнительной информации и приемов ее использования с целью повышения однозначности решения.

В данном разделе рассмотрим различные подходы и способы реализации количественной интерпретации, а также возникающие при этом особенности проявления неоднозначности получаемых решений и некоторые из приемов ее снижения.

Существующие способы решения обратной задачи можно условно разделить на способы, реализующие метод подбора, прямые численные способы и, назовем их, эвристические способы, использующие те или иные эмпирические зависимости между наблюдаемыми данными и параметрами среды.

Способы решения обратной задачи, основанные на подборе

Суть метода подбора заключается в минимизации расхождения между наблюдаемым графиком $\rho_k(r)$ и теоретической кривой зондирования, вычисляемой для разных вариантов задаваемых значений параметров модели среды.

Классическим примером применения метода подбора являются палеточные способы интерпретации, при которых наблюдаемая кривая зондирования сравнивается визуально с помощью специальных методик с набором эталонных теоретических кривых зондирования, рассчитанных для характерных (двух, либо трехслойных) моделей сред. В качестве решения выбирается та теоретическая модель, график $\rho_k(r)$ для которой обеспечивает наилучшее ее совпадение с наблюдаемой кривой зондирования.

Интерпретация с помощью палеток, являвшаяся в течение нескольких десятилетий основным способом получения количественной информации о разрезе, сыграла большую роль в создании основ практической электроразведки. Благодаря усилиям многих исследователей [Пылаев, 1968; Каленов, 1957; Матвеев, 1974; Хмелевской, 1984 и др.] были разработаны различные варианты палеток и методик их применения, исследованы возможности применения метода электрического зондирования при решении различного рода задач.

С появлением ЭВМ началось интенсивное развитие численных способов метода подбора. Математически его реализация сводится к минимизации функционала невязки (функции отклика, функции цели), в качестве которой часто используют среднее квадратичное расхождение сравниваемых функций

$$F(\vec{p}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\rho_{k_j}^{\ominus}(r) - \rho_{k_j}^T(r)}{\rho_{k_j}^T(r)} \right)^2 = \min, \quad (2.48)$$

либо логарифмическую их невязку

$$F(\vec{p}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\ln(\rho_{k_j}^{\ominus}(r) / \rho_{k_j}^T(r)) \right]^2 = \min, \quad (2.49)$$

где $\rho_{k_j}^{\ominus}(r)$ — наблюдаемая кривая зондирования; $\rho_{k_j}^T(r)$ — теоретическая кривая зондирования, вычисленная по заданным параметрам модели среды; $\vec{p} = \{h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}$ — вектор параметров разреза; n — число слоев; N — число разносов питающей линии установки.

При наличии информации о характере распределения ошибок наблюдений, о статистических свойствах погрешности, о диапазонах эффективного влияния отдельных слоев и т. п., возможно использовать и другие виды оценок расхождения наблюдаемых и расчетных данных. Так, при наличии сведений о статистическом распределении погрешно-

стей наблюдения для такой оценки привлекают функцию правдоподобия [Порохова и др., 1987]

$$F_1(\vec{p}) = -(2\pi D_0)^{-N/2} \left[\prod_{j=1}^n \sqrt{(p_{K_j}^T)^2 \cdot D_0} \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \sum_{j=1}^n \left(\frac{p_{K_j}^{\ominus} - p_{K_j}^T}{p_{K_j}^T} \right) \cdot D_0^{-1} \right], \quad (2.50)$$

где D_0 — относительная дисперсия экспериментальных данных.

В общем случае отыскание минимума функции невязки представляет собой задачу решения системы нелинейных уравнений

$$\frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_i} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (2.51)$$

где $k = 2n - 1$ — общее число параметров.

Обычно для реализации процесса минимизации используют линейаризацию данной задачи, сводя уравнение (2.51) к системе линейных алгебраических уравнений, для решения которых существует достаточно хорошо разработанный математический аппарат. Линейаризация выполняется путем разложения выражения (2.51) в окрестности начального приближения $\rho^{(3)}$ в ряд Тейлора и ограничения его первым членом, т. е.

$$\frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_i} \approx \left(\frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_i} \right)_{\rho^{(0)}} + \sum_{\xi=1}^k \left(\frac{\partial^2 F(\vec{p})}{\partial p_i \partial p_{\xi}} \right) \cdot \Delta p_{\xi}, \quad (2.52)$$

Предполагается, что функция $F(\vec{p})$ в окрестности $\rho^{(0)}$ регулярная и унимодальная (имеет один экстремум).

В результате (2.51) сводится к системе линейных уравнений относительно поправок Δp :

$$A_{\xi, i} \cdot \Delta p_{\xi} = B_i, \quad (2.53)$$

где

$$A_{\xi, i} = - \left(\frac{\partial^2 F(\vec{p})}{\partial p_i \partial p_{\xi}} \right)_{\rho^{(0)}}; \quad B_i = \left(\frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_i} \right)_{\rho^{(0)}}.$$

Используя полученную оценку $p^{(1)} = p^{(0)} + \Delta p$ в качестве нового начального приближения вновь решают систему (2.52) и т. д. до сходимости процесса.

Многочисленные исследования различных способов минимизации на многослойных кривых зондирования [Уайлд, 1967; Валюс, Рудерман, 1972; Яновская, Порохова, 1983, Vozoff, 1958, Backus, Gilbert, 1967 и др.] показали, что минимизируемая функция $F(\vec{p})$ имеет, как правило, сложный для минимизации многоэкстремальный «овражный» характер. Чувствительность ее к изменению параметров слоев различна и убывает с увеличением номера слоя. Это убывание не монотонно, а зависит от типа разреза и соотношения его параметров.

Наиболее полно, на наш взгляд, проблемы минимизации освещены в работе [Яновская, Порохова, 1983], где, в частности, показано, что сложный «овражный» характер функции $F(\vec{p})$ является результатом слабой информативности отдельных параметров, при которой их изменение мало сказывается на величине $F(\vec{p})$. При наличии взаимозависимых параметров рельеф этой функции еще более усложняется, приводя к появлению ложных экстремумов, повороту главных осей фигур относительно координатных осей и др. Наиболее эффективной при минимизации «овражных» функций признана методика двухэтапной минимизации. На первом из них рекомендуется использовать один из методов, позволяющих быстро спускаться на дно «оврага» (например, метод Ньютона — Рафсона), на втором — по минимальному значению функции цели определяется направление спуска и выполняется движение по дну «оврага» до его «котловины».

И все же использование этих приемов не гарантирует единственности решения. При наличии нескольких минимумов эти методы не исключают «застревания» в одном из них, не являющимся абсолютным.

Проблемы поиска глобального экстремума в данном случае можно считать следствием проявления недоопределенности исходных данных, которая в условиях некорректности обратной задачи не разрешима чисто математическими методами без привлечения дополнительной информации о решении, и требует применения тех или иных приемов регуляризации.

Первая попытка применения регуляризации по А. Н. Тихонову при решении обратной задачи ВЭЗ рассмотрена в работе [Зиненберг, 1973]. В разработанном ими алгоритме решение обратной задачи осуществляется путем минимизации квадратичного отклонения между теоретиче-

ской и измеренной кривыми ВЭЗ с учетом «разумных» ограничений, накладываемых на искомые параметры. Задача сводилась к минимизации функционала следующего вида:

$$S^{\alpha}(\vec{p}) = \sum_{j=1}^N K_j [\rho_{kj} - \bar{p}_k(r_j \vec{p})]^2 + \alpha \sum_{i=1}^{2n-1} \ln[(p_i^B - p_i)(p_i - p_i^H)],$$

где $\vec{p} = (\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_{n-1}, h_{n-1}, \rho_n)$ — вектор неизвестных параметров; ρ_i^B, ρ_i^H — верхний и нижний пределы изменения параметров нулевого приближения; $\rho_{kj}, \bar{p}_k(r_j \vec{p})$ — соответственно наблюдаемая и расчетная функции кажущегося сопротивления; K_j — некоторые веса; α — параметр регуляризации ($\alpha \rightarrow 0$).

Данный способ в дальнейшем получил свое развитие в работе [Мыщик, 1984], где в качестве дополнительной информации помимо ограничения на параметры были введены ограничения на ряд функции этих параметров (проводимость, поперечное сопротивление слоев, суммарную мощность нескольких слоев и др.).

Наряду с детерминированным, известны попытки и статистического подхода к доопределению обратной задачи, в котором в качестве дополнительной используется статистическая информация о величине и характере распределении погрешностей наблюдений. Основы такого подхода в геофизике заложены Ф. М. Гольцманом [Гольцман, 1971, 1981].

Примером применения статистического подхода для метода электрического зондирования является работа [Порохова и др., 1987], где помимо величины невязки экспериментальных и расчетных данных использована оценка дисперсия параметров, характеризующая устойчивость решения. Используя в качестве функции цели критерий максимального правдоподобия (2.50) и подставляя его в выражение (2.51), обратная задача в конечном итоге сводится к решению системы линейных уравнений вида (2.53). Несмотря на ограниченные условия применения данного подхода (число замеров на кривой зондирования должно во много раз превышать число искомых параметров; необходимость в наличии информации о характере распределения случайных величин, свойствах статистических оценок и др.), он позволяет получать важную информацию об относительной устойчивости параметров, диапазонах их эффективного проявления, наличии между ними корреляционных связей, что позволяет вносить коррективы в параметризацию исходной модели и процесс минимизации.

Прямые численные способы количественной интерпретации ВЭЗ

Прямые численные способы количественной интерпретации основаны на получении и использовании аналитических соотношений, выражающих искомые параметры среды через характеристики наблюдаемого поля. Существует несколько подходов к реализации данной идеи.

Рассмотрим один из них, называемый способом «снятия слоев» [Pekeris, 1940; Шкабарня, Куничкина, 1965; Страхов, 1966, 1968; Koefoed 1965, 1968; Романов (1969); Гудзь 1972, 1976; Матвеев, 1974; Колесников 1981; Vasokur, 1984, 1999 и др.]. В его основе лежит численный анализ функции $R_1(m)$, входящей в подынтегральное выражение формулы кажущегося сопротивления для горизонтально-слоистой среды (1.14). Функция $R_1(m)$ может быть получена из функции кажущегося сопротивления $\rho_k(r)$ с помощью интегрального преобразования Ханкеля [Slichter, 1933; Шкабарня, Куничкина, 1965], которое для (1.14) имеет следующий вид:

$$\bar{\rho}_k(r) = \int_0^{\infty} R_1(m) J_1(mr) m dm, \quad (2.54)$$

$$R_1(m) = \int_0^{\infty} \bar{\rho}_k(r) J_1(mr) r dr, \quad (2.55)$$

где $\bar{\rho}_k(r) = \rho_k(r) / (\rho_1 r^2)$.

Связь функции $R_1(m)$ с параметрами среды выражается через гиперболические (1.101), либо через экспоненциальные (1.102) функции. В соответствии с формулой (1.101)

$$R_1(m) = \operatorname{th} \left(m_1 h_1 + \operatorname{Arth} \frac{\rho_2}{\rho_1} R_2(m) \right), \quad (2.56)$$

где

$$R_2(m) = \operatorname{th} \left(m_2 h_2 + \operatorname{Arth} \frac{\rho_3}{\rho_2} R_3(m) \right),$$

.....

$$R_i(m) = \operatorname{th} \left(m h_i + \operatorname{Arth} \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} R_{i+1}(m) \right),$$

$$R_n(m) = 1.$$

Суть численного способа «снятия слоев» сводится к выполнению следующих операций. Полагая, что в диапазоне эффективного влияния первого слоя (диапазон наибольших значений m) влияние последующих слоев незначительно, то есть $R_2(m) \approx 1$ (рис. 2.13), для соседних значений аргумента функции $R_1(m)$ можно составить систему из двух уравнений (2.56), решение которых приводит к формулам для определения параметров первого слоя:

$$h_1 = \frac{\ln H_1(m_j) - \ln H_1(m_{j+1})}{2(m_j - m_{j+1})}; \quad (2.57)$$

$$\mu_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\Psi_1(m_j) - 1}{\Psi_1(m_j) + 1}, \quad (2.58)$$

где
$$H_1(m_j) = \left[\frac{1 + R_1(m_j)}{1 - R_1(m_j)} \right]; \quad \Psi_1(m_j) = H_1(m_j) \cdot e^{-2mh_1}.$$

Выполнив пересчет исходной функции $R_1(m)$ в функцию $R_2(m)$ по формуле (1.118), и повторив для нее вышеприведенные операции в диапазоне эффективного влияния второго слоя (при $R_3(m) = 1$), получаем параметры второго слоя (h_2, μ_2), и так далее, до тех пор, пока при очередном пересчете полученная функция $R_i(m)$ не станет равной единице с точностью до погрешностей ее получения, что соответствует слою бесконечно большой мощности (см. раздел 1.6). Индекс этой функции, соответствующий номеру последнего слоя, определяет число слоев для анализируемой кривой зондирования. Поскольку каждый пересчет функции $R_i(m)$ в $R_{i+1}(m)$ приводит к последовательному устранению влияния предыдущего слоя, то есть как бы соответствует смещению поверхности наблюдений на кровлю очередного слоя, это и определило название данного способа.

Несмотря на ряд привлекательных моментов — принципиальную возможность получения параметров и числа слоев непосредственно по наблюдаемым данным, открывающих перспективы полной автоматизации процесса интерпретации, рекуррентность выражений, определяющих простоту и эффективность вычислительной схемы, исследование данного способа

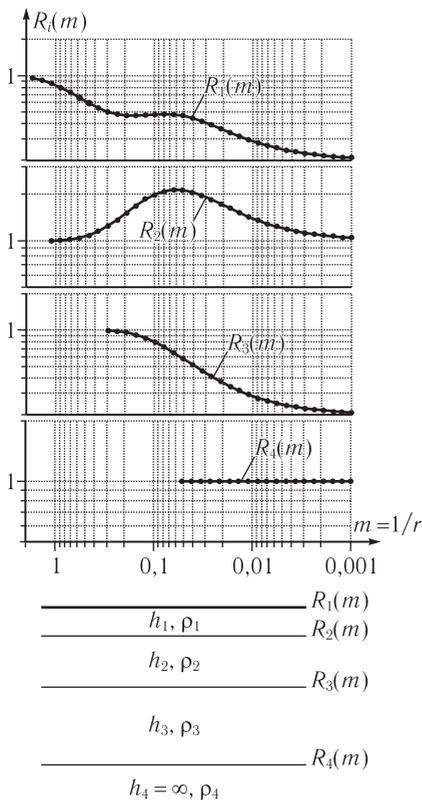


Рис. 2.13. Пример пересчета функции $R_i(m)$ в нижнее полупространство для четырехслойной модели среды с параметрами $h_1 = 2$ м, $\rho_1 = 50$ Ом·м, $h_2 = 7$ м, $\rho_2 = 10$ Ом·м, $h_3 = 16$ м, $\rho_3 = 50$ Ом·м, $\rho_4 = 10$ Ом·м

и попытки создания на его основе эффективных алгоритмов решения обратной задачи (Шкабарня и др. 1965, 1971; Страхов, 1966, 1968, 1969; Матвеев, 1970, 1974; Гудзь, 1972, 1976; Колесников 1981; Koefoed, 1965, 1968; Куфуд 1984; Keceli, 1983 и др.) выявили ряд серьезных трудностей, связанных с неопределенностью и неустойчивостью получаемых решений, их повышенной чувствительностью к погрешностям анализируемой функции и параметрам численной схемы его реализации. Резко выраженная зависимость погрешности определения параметров слоя от точности определения параметров предыдущего слоя, приводит к тому, что любые искажения функции ρ_k в диапазоне эффективного влияния i -го слоя резко снижают точность определения параметров всех последующих слоев. Следует отметить, что первопричиной неустойчивости, как и в случае метода подбора, является некорректность обратной задачи, проявляющаяся в данном случае в неустойчивости вычислительных операций.

Известно несколько подходов к повышению устойчивости способа «снятия слоев», направленных в основном на повышение точности вычислительных схем: а) путем применения трехслойной аппроксимации функции $R_i(m)$ в диапазоне эффективного влияния слоя [Гудзь, 1972, 1976]; б) использования теоретических закономерностей поведения промежуточных вычислительных соотношений [Матвеев, 1970, 1974; Koefoed, 1968]; в) последовательного уточнением параметров численной схемы с контролем решений на основе сопоставления исходной

и расчетной функций $R_i(m)$ [Колесников, 1981]; г) использования приемов статистического моделирования, модельной фильтрации [Колесников, 1986] и др. Однако экспериментальные оценки показывают ограниченные условия его применения, связанные с определенными требованиями к экспериментальному материалу и параметрам среды (наличие хорошо выраженных асимптотических ветвей кривых зондирования, отсутствие резких искажений экспериментального материала, умеренная дифференциация слоев по сопротивлению и др.). Вместе с тем, имеется неопределенность задания и использования априорной количественной информации в процессе численного анализа.

Из других подходов к реализации прямых численных методов анализа кривых зондирования, следует отметить способ, основанный на определении искомых параметров среды с помощью некоторой функции, характеризующей распределение «мнимых» источников [Kunetz, Rocroi, 1970]. Рассмотрим суть данного способа.

Функция кажущегося сопротивления для горизонтально слоистой среды может быть представлена в виде суммы ряда [Ehrenburg, Watson, 1932; Заборовский, 1963]:

$$\frac{\rho_k(r)}{\rho_1} = 1 + 2r^3 \sum_{p=1}^{\infty} q_p / [r^2 + (2p \cdot h_0)^2]^{3/2}, \quad (2.59)$$

где ρ_1 — удельное сопротивление верхнего слоя; r — расстояние от источника до точки наблюдения; h_0 — общая мера мощностей слоев, слагающих разрез; q_p — коэффициенты эмиссии или интенсивности «мнимых» источников.

Г. Кунетц и Дж. Рокруа ввели вспомогательную четную с периодом 2π функцию $q(\omega)$, представляющую собой ряд Фурье для последовательности «мнимых» источников,

$$q(\omega) = 1 + 2 \sum_{p=1}^{\infty} q_p \cos p\omega,$$

где

$$q_p = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} q(\omega) \cos p\omega d\omega. \quad (2.60)$$

После подстановки соотношения (2.60) в уравнение (2.59) и несложных преобразований последнее уравнение приводится к виду

$$y(t) = \frac{2t^2}{\pi} \int_0^\pi \varphi(\omega) \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} |\omega + 2n\pi| K_1[t|\omega + 2n\pi|] d\omega, \quad (2.61)$$

где $t = r/2h_0$; $y(t) = \rho_k(2h_0 t)/\rho_1$; $K_1(t\omega) = \frac{t}{\omega} \int_0^\infty \frac{\cos p\omega}{(p^2 + t^2)^{3/2}} dp$ — моди-

фицированная функция Бесселя первого рода.

Основным достоинством введенной функции $\varphi(\omega)$ является то, что она позволяет с помощью (2.60) сравнительно легко переходить к коэффициентам q_p , для которых имеется математический аппарат получения характеристик среды [Ваганов, Кунетц, 1958], что открывает возможность решения обратной задачи электрического зондирования.

Кроме того, функция $\varphi(\omega)$ может использоваться и при решении прямой задачи ВЭЗ. Ее связь с параметрами горизонтально-слоистой среды выражается сравнительно простым соотношением

$$\varphi(\omega) = \frac{1}{P_n^2(\omega) + Q_n^2(\omega)} \frac{\rho_n}{\rho_1}, \quad (2.62)$$

$P_n(\omega)$ и $Q_n(\omega)$ вычисляются по рекуррентным формулам:

$$P_{p+1}(\omega) = \frac{1}{1 - K_p} [P_p(\omega)(1 - K_p \cos H_p \omega) - Q_p(\omega)K_p \sin H_p \omega];$$

$$Q_{p+1}(\omega) = \frac{1}{1 - K_p} [P_p(\omega)(-K_p \sin H_p \omega) + Q_p(\omega)(1 + K_p \cos H_p \omega)],$$

где $K_p = \frac{\rho_{p+1} - \rho_p}{\rho_{p+1} + \rho_p}$; $H_p = \frac{1}{h_0} \sum_{j=1}^p h_j$; $P_1(\omega) = 1$; $Q_1(\omega) = 0$.

Основные этапы методики определения параметров геоэлектрического разреза по алгоритму Г. Кунетца и Дж. Рокруа сводятся к следующим.

1. Вычисление положительной, четной функции $\varphi(\omega)$, наилучшим образом удовлетворяющей экспериментальным значениям кажущегося сопротивления в точках, в которых выполнены замеры.

2. Определение последовательности «мнимых» источников.

3. Вычисление функции изменения удельных электрических сопротивлений с глубиной.

4. Получение частных геологически приемлемых решений. Для вычисления функции $\varphi(\omega)$ по полевой кривой $y(t)$ интеграл в правой части (2.65) аппроксимируют суммой, полагая $\varphi(\omega)$ равной постоянной величине φ_j в промежутке $\omega_{j-1} < \omega < \omega_j$ ($j = 1, 2, \dots, N$); $\omega_0 = 0$; $\omega_n = \pi$. Функцию $\varphi(\omega)$ при условии $\varphi_j > 0$ находят путем минимизации функционала

$$U = \sum_i \frac{P_i^2}{y^2(t_i)} \left[y(t_i) - \sum_j \varphi_j \int_{\omega_{j-1}}^{\omega_j} H(\omega t_i) d\omega \right]^2,$$

где

$$H(\omega t_i) = \frac{2t^2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} |\omega + 2n\pi| K_1 [t|\omega + 2n\pi|];$$

P_j — веса каждого i -го замеренного значения $y(t_i)$. При наличии априорных данных об изменении сопротивления с глубиной вместо U минимизируют сумму $U + \mu^2 K$, где $K = \int_0^\pi [\varphi(\omega) - \Phi(\omega)]^2 d\omega$; $\Phi(\omega)$ — функция,

вычисляемая по формуле (2.62), для заданного по априорным данным распределения сопротивлений; μ — параметр, подбираемый экспериментально.

Определив $\varphi(\omega)$, с помощью (2.60) находят последовательность коэффициентов эмиссии q_p . Последующий анализ с целью определения удельных сопротивлений среды производится аналогично тому, как в сейсморазведке получают коэффициенты отражений по известному алгоритму [Ваганов, Кунетц, 1958]. Формула для вычисления относительных сопротивлений имеет вид

$$\frac{\rho_{p+1}}{\rho_p} = \frac{1 + K_p}{1 - K_p},$$

где K_p — коэффициенты «отражений», вычисляемые с помощью рекуррентных соотношений:

$$K_p = q_p X_0^{p-1} + q_{p-1} X_1^{p-1} + \dots + q_1 X_{p-1}^{p-1};$$

$$X_j^p = \frac{1}{1 - K_p^2} (X_j^{p-1} - K_p X_{p-j}^{p-1}); \quad X_0^0 = 1.$$

Полученный таким образом результат изменения сопротивлений с глубиной представляет собой «сырое» или «грубое» решение, которое в силу погрешностей вычислений и некорректности обратной задачи характеризуется чрезмерной детальностью и неустойчивостью.

Для получения «частного» решения, соответствующего геологически приемлемому распределению параметров среды (h_i, ρ_i), используют кривую Дар-Заррук (DZ) [Orellana, 1963 и др.], представляющую собой зависимость эффективного сопротивления $\rho_{DZ} = \sqrt{T/S}$ от эффективной мощности $h_{DZ} = \sqrt{T \cdot S}$ (рис. 1.23), где T и S — соответственно суммарные поперечное сопротивление и продольная проводимость до текущей глубины z .

В случае истинных параметров среды $\rho_{DZ} = \rho_m$; $h_{DZ} = \lambda \cdot H$, где ρ_m и λ — соответственно среднее квадратичное сопротивление и общий коэффициент анизотропии толщи пород до текущей глубины z .

Приемлемые частные решения получают путем сглаживания кривой DZ , отвечающей результатам «грубого» решения, с учетом основных точек перегиба (рис. 2.14), количество и расположение которых выбирается в соответствии с априорными представлениями о разрезе. На этой стадии может быть введена вся дополнительная информация. Переход от

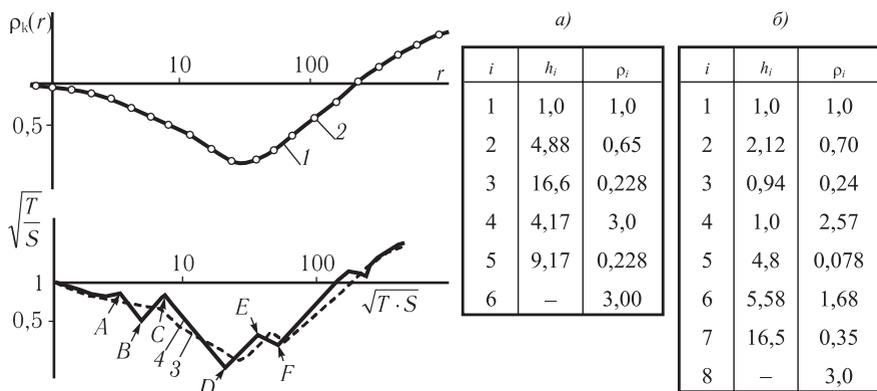


Рис. 2.14. Пример интерпретации теоретической кривой $\rho_k(r)$ по программе Г. Кунца и Дж. Рокруа. 1 и 2 — соответственно теоретическая и рассчитанная по результатам «частного» решения кривые $\rho_k(r)$; 3 и 4 — кривые DZ соответственно для истинного и «грубого» решений; буквами обозначены точки перегиба кривой DZ , соответствующие «частному» решению; истинные параметры разреза и «частное» решение приведены соответственно в таблицах а) и б)

«грубого» решения к «частному» определяется опытом, интуицией и мастерством интерпретатора. Каждое решение контролируется путем вычисления соответствующей кривой кажущегося сопротивления и сравнения ее с исходной.

Попытка использования хорошо разработанного аппарата анализа сейсморазведочных данных для прямой интерпретации кривых зондирования предпринимались также в работе [Szaraniec, 1982b; Taeyong et. al. 2004].

Наряду с рассмотренными, известен ряд вариантов решения обратной задачи прямыми численными методами, где результатом решения служит непосредственно функция изменения сопротивлений с глубиной [Опарин, 1975; Филатов 1976; Курдюков, Соболев, 1992), однако их практическая реализация, как правило, сопряжена с рядом существенных ограничений на искомую функцию и резкой неустойчивостью решения.

Эвристические способы количественной интерпретации

Наряду со способами количественной интерпретации, базирующихся на достаточно строгом физико-математическом аппарате решения прямых и обратных задач, в электроразведке методом сопротивлений существует ряд упрощенных способов количественной экспресс-интерпретации электрических зондирований, основанных на использовании различных эмпирических зависимостей между наблюдаемыми данными и параметрами среды, опирающихся на общие теоретические положения метода, закономерности и особенности поведения графиков зондирования (асимптотические соотношения, корреляционные связи и т. п.). Такие способы можно условно назвать эвристическими.

Известен ряд эмпирических формул, связывающих характерные точки и участки кривой зондирования (точки экстремумов, угол наклона касательной к асимптотической ветви и др.) с некоторыми обобщенными параметрами разреза (продольным удельным сопротивлением, суммарной продольной проводимостью и др.) [Матвеев, 1974].

К таким способам можно отнести и упрощенный вариант интерпретации данных ВЭЗ с использованием кривых DZ , предложенный в работе [Zohdy, 1975, 1989], в которой для получения решения использовано сходство кривых $\rho_k(r)$ и DZ . Принимая в первом приближении координаты точек кривой $\rho_k(r)$ (ρ_{k_j}, r_j) за координаты кривой DZ (ρ_{DZ_j}, h_{DZ_j}), содержащей число слоев, равное числу разностей, получают некоторую совокупность параметров слоев h_i, ρ_i по формулам

$$\rho_1 = \rho_{DZ_1}; \rho_j = \sqrt{\frac{h_{DZ_j} \rho_{DZ_j} - h_{DZ_{j-1}} \rho_{DZ_{j-1}}}{h_{DZ_j} / \rho_{DZ_j} - h_{DZ_{j-1}} / \rho_{DZ_{j-1}}}}; \quad (2.63)$$

$$h_1 = h_{DZ_1}; h_j = \rho_j \left(\frac{h_{DZ_j}}{\rho_{DZ_j}} - \frac{h_{DZ_{j-1}}}{\rho_{DZ_{j-1}}} \right); j = 1, 2, \dots, N, \quad (2.64)$$

где N — число слоев, равное числу разностей. Далее процесс интерпретации выполняется методом подбора в следующей последовательности. По вычисленным параметрам h_i , ρ_i рассчитывают кривую $\rho_k^{(1)}(r)$, которую сравнивают с наблюдаемой кривой $\rho_k(r)$. Второе и последующие приближения к решению находят по формулам (2.63), (2.64) в результате итерационного процесса за счет изменения ρ_{DZ} :

$$\rho_{DZ_j}^{(n+1)} = \frac{\rho_{kj}(r)}{\rho_k^{(n)}(r)} \rho_{DZ}^{(n)},$$

где n — номер итерации. Процесс ведут до тех пор, пока сравниваемые кривые $\rho_k(r)$ и $\rho_k^{(n)}(r)$ не совпадут с заданной точностью.

Последующий выбор «частного» решения, отвечающего геологической ситуации, выполняется так же, как в рассмотренном выше алгоритме Г. Кунетца и Дж. Рокруа.

Другим примером может служить способ, основанный на выявлении и использовании корреляционных связей между характерными точками кривой зондирования и параметрами среды, по результатам численного моделирования [Колесников, 1990]. Основная идея способа — оценить возможные пределы изменения параметров слоев для заданного модельного класса и в рамках этих пределов установить корреляционные связи между экспериментальными данными и искомыми параметрами среды.

В качестве характерных (или особых) для каждого i -го слоя выбраны следующие точки (рис. 2.15): точку T_i с координатами X_i^T, Y_i^T , соответствующую минимальному изменению кривой зондирования, точки G_i, G_{i+1} с координатами X_i^G, Y_i^G , и X_{i+1}^G, Y_{i+1}^G , соответствующие максимальному градиенту ее изменения. Эти точки однозначно определяются для любого типа разреза по минимумам и максимумам модуля первой производной функции $y = \ln \rho_k(r)$ (рис. 2.15). Точка T_i тяготеет к середине диапазона эффективного проявления i -го слоя, а точки G_i, G_{i+1} — к его грани-

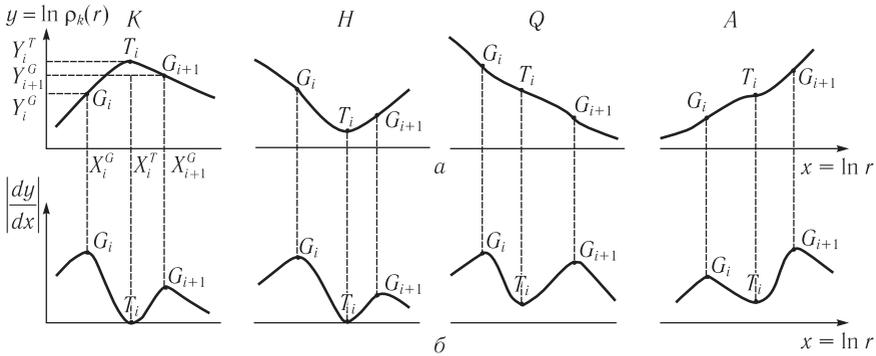


Рис. 2.15. Характерные точки (T_i, G_i, G_{i+1}) i -го слоя кривых зондирования (а) и их отображение на графиках модуля первой производной функции кажущегося сопротивления (б); $y = \ln \rho_k(r); x = \ln r$

цам. Связь между истинными параметрами среды и эффективными параметрами особых точек можно представить в виде

$$Z_i = \alpha X_i^T;$$

$$h_i = \beta \cdot (X_{i+1}^G - X_i^G) = \beta \Delta X_i;$$

$$\mu_i = \gamma \left(\frac{dy}{dx} \right)_{G_i} = \gamma \Delta G_i,$$

где $Z_i = \sum_{\varepsilon=1}^i h_i$ — глубина до подошвы i -го слоя; $\Delta X_i = (X_{i+1}^G - X_i^G)$ — диапазон аномального проявления i -го слоя на кривой зондирования; $\mu_i = \rho_i / \rho_{i-1}$ — относительное сопротивление i -го слоя ($i > 1$); $\Delta G_i = \left(\frac{dy}{dx} \right)_{G_i}$ — градиент функции $y(x)$ в точке $G_i, y = \ln \rho_k(r); x = \ln r$; α, β, γ — неизвестные коэффициенты, зависящие от соотношения параметров среды.

Задача выделения особых точек сводится к определению координат экстремумов (кривые ВЭЗ типов K и H), перегибов (типы Q, A) и точек максимального изменения значений функции $\rho_k(r)$ в рамках «коридора» доверительных значений данной функции, определяемого погрешностью полевых наблюдений.

Определение областей существования решения относительно координат особых точек выполняется на основе математического моделирования, включающего вычисление $\rho_k(r)$ для заданных параметров горизонтально-слоистой среды и определение координат особых точек по вычисленным графикам зондирования.

Такие расчеты выполнены для различных типов трехслойного разреза при значениях относительного сопротивления второго слоя: $\mu_2 = 2, 4, 8, 16, 25$ и $\mu_2 = 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/25$. Величина относительного сопротивления третьего слоя, в зависимости от типа разреза, задавалось равной $\mu_3 = \mu_2$ либо $\mu_3 = 1/\mu_2$. Относительная мощности второго слоя $v_2 = h_2/h_1$ менялась на сетке значений от $v_2 = 1,5$ до $v_2 = 11,4$ со знаменателем геометрической прогрессии, равным 1,5.

Анализ полученных результатов показал, что для заданного модельного класса глубина залегания подошвы второго слоя и его удельное электрическое сопротивление меняются в следующих пределах:

для кривых ВЭЗ типа *H*:

$$X_2^G - 0,10 \leq \ln Z_2 \leq X_2^T + 0,30; \quad (2.65)$$

$$Y_2^T - 1,24 \leq \ln \rho_2 \leq Y_2^T - 0,08; \quad (2.66)$$

для кривых ВЭЗ типа *K*:

$$X_2^G + 0,10 \leq \ln Z_2 \leq X_2^T + 0,20; \quad (2.67)$$

$$Y_2^T + 0,10 \leq \ln \rho_2 \leq Y_2^T + 1,80; \quad (2.68)$$

для кривых ВЭЗ типа *Q*:

$$X_2^G - 0,02 \leq \ln Z_2 \leq X_2^T + 0,33; \quad (2.69)$$

$$Y_2^T - 0,06 \leq \ln \rho_2 \leq Y_2^T + 0,92; \quad (2.70)$$

для кривых ВЭЗ типа *A*:

$$X_2^T - 0,30 \leq \ln Z_2 \leq X_2^T + 0,50; \quad (2.71)$$

$$Y_2^T + 0,06 \leq \ln \rho_2 \leq Y_2^T + 2,20; \quad (2.72)$$

В результате анализа и опробования различных вариантов, выбрана следующая структура формул для определения параметров промежуточных слоев разреза ($1 < i < n$):

$$\bar{P}_i = \eta_{i\min} + (\eta_{i\max} - \eta_{i\min}) \cdot K(P_i);$$

где $\bar{P}_i = \ln P_i$; P_i — искомый параметр i -го слоя (Z_i , либо ρ_i); η_{\min} , η_{\max} — соответственно предельные значения параметра по данным моделирования (2.65)–(2.72); $K(P_i)$ — коэффициенты связи, зависящие от соотношения параметров среды ($0 \leq K(P_i) \leq 1$).

На основе анализа нескольких видов зависимостей (линейной, логарифмической, степенной) для определения $K(P_i)$ выбрано соотношение

$$K(P_i) = a + b\Delta X_i + c(\Delta G_i + \Delta G_{i+1});$$

где a, b, c — коэффициенты регрессии, приведенные в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Тип кривой ВЭЗ	Коэффициенты регрессии					
	Для $K(Z_2)$			Для $K(P_2)$		
	a	b	c	a	b	c
H	-0,46	0,67	-0,04	0,32	0,42	-0,27
K	-0,66	0,91	-1,01	0,44	-0,46	0,95
Q	-0,18	0,61	-0,23	0,14	-0,24	0,39
A	0,81	0,09	-0,25	-0,10	-0,19	0,62

В результате получены следующие соотношения для определения параметров промежуточных слоев разреза по особым точкам кривой зондирования:

тип H $Z_2 = \exp[(X_2^T - X_2^G + 0,4)K(Z_2) + X_2^G - 0,1];$ (2.73)

$$\rho_2 = \exp[1,17K(\rho_2) + Y_2^T - 1,24];$$
 (2.74)

тип K $Z_2 = \exp[(X_2^T - X_2^G + 0,1)K(Z_2) + X_2^G + 0,1];$ (2.75)

$$\rho_2 = \exp[1,70K(\rho_2) + Y_2^T + 0,10];$$
 (2.76)

тип Q $Z_2 = \exp[(X_2^T - X_2^G + 0,33)K(Z_2) + X_2^G];$ (2.77)

$$\rho_2 = \exp[0,98K(\rho_2) + Y_2^T - 0,06];$$
 (2.78)

тип A $Z_2 = \exp[0,65K(Z_2) + X_2^T - 0,3];$ (2.79)

$$\rho_2 = \exp[1,56K(\rho_2) + Y_2^T + 0,06];$$
 (2.80)

Определение параметров первого и последнего слоев выполняется с помощью асимптотических соотношений (1.139), (1.140), (1.144), (1.145).

Выполненная оценка точности определения параметров среды по формулам (2.73)–(2.80) для заданного выше модельного класса показала, что погрешность определения Z_2 меняется в пределах от 1 до 18 %, а ρ_2 — от 1 до 21 %, при средней величине погрешности соответственно 8 % (для Z_2) и 13 % (для ρ_2). При этом наибольшая средняя погрешность наблюдается при вычислении ρ_2 по кривым ВЭЗ типов K (15 %) и A (13 %), наименьшая — для типов H (11 %) и Q (10 %). Погрешность определения Z_2 слабо зависит от типа кривой ВЭЗ.

К достоинствам данного способа можно отнести то, что он позволяет определять искомые параметры в заведомо ограниченных пределах, полученных в результате математического моделирования для заданного модельного класса с точностью, адекватной информативности первичного материала. В отличие, скажем, от численного способа «снятия слоев», вычисляемые параметры каждого слоя в значительно меньшей степени зависят от точности определения параметров соседних слоев. Все это позволяет использовать данный способ как при экспресс-интерпретации, так и для получения начального приближения параметров модели при автоматической интерпретации методом подбора.

В силу практической недоопределенности обратной задачи, важным этапом истолкования данных электрического зондирования является оценка класса возможных решений, отвечающего точности получения полевого материала. Для оценки неоднозначности результатов интерпретации, в принципе, могут быть использованы как детерминированные методы, основанные на определении предельных значений параметров слоев в результате перебора различных вариантов решений в рамках δ -эквивалентности [Пылаев, 1968; Матвеев, 1974 и др.], так и статистические [Колесников, 1986; Петрухин, 1986; Порохова, Шевнин, 1987; Пятин, 2003].

2.7. Геологическое истолкование результатов электрического зондирования

Геологическое истолкование физических решений, получаемых с помощью методов количественного анализа электрических зондирования, является весьма ответственным этапом интерпретационного процесса. В силу неоднозначного соответствия между геологическими и фи-

зическими характеристиками пород, возможного наличия нескольких вариантов расчленения разреза на обобщенные пакки слоев в каждой точке зондирования, существования эквивалентности в определении физических характеристик слоев, геологическое истолкование всегда содержит тот или иной элемент недоопределенности, не позволяющей в большинстве случаев сделать единственно правильное геологическое заключение о строении изучаемой среды.

Реализация данной задачи, ввиду ее недоопределенности, в общем случае связана с разработкой способов и приемов использования дополнительной информации (геологической, гидрогеологической, параметрических данных о физических характеристиках среды и др.) с целью формирования геоэлектрической модели исследуемого участка и обеспечения необходимой достоверности решения поставленной задачи.

Геологическое истолкование электроразведочных материалов основывается на физической содержательности электрического сопротивления, определяющего природу выделяемых аномалий. Для подавляющего большинства горных пород в условиях естественного их залегания, при отсутствии в их составе электропроводящих минералов, удельное электрическое сопротивление определяется главным образом пористостью и трещиноватостью этой породы, ее флюидонасыщенностью (водо-, газо-, нефтесодержанием), при водонасыщенности — количеством и минерализацией воды в порах и трещинах [Кобранова, 1962; Дахнов, 1982 и др.]. В несколько меньшей степени на величину удельного сопротивления оказывают влияние структура и текстура пород, температура и давление.

Многообразие факторов, оказывающих влияние на величину сопротивления, является, с одной стороны, физической предпосылкой применимости методов электроразведки для решения тех или иных задач, связанных с изучением геологического строения и физического состояния геологической среды, с другой — предъявляет повышенные требования к способам геологического истолкования, которые обеспечивали бы необходимую однозначность и достоверность получаемых материалов.

Геологическое истолкование электроразведочных материалов требует учета конкретной ситуации — литологического состава пород, возможных фациальных изменений, степени минерализации вод и т. п. Часто в результате существующих причинно-следственных связей общий эффект от влияния разных факторов усиливается, например, при гидрогеологиче-

ских исследованиях повышение трещиноватости и разуплотненности пород увеличивает количество водосодержания, что в свою очередь более активизирует процессы выщелачивания пород, повышая тем самым минерализацию водных растворов. Совокупное наличие этих факторов, каждый из которых направлен на уменьшение сопротивления породы, приводит к суммарному эффекту, проявляющемуся в образовании резко выраженных аномалий пониженного электрического сопротивления, что является диагностическим признаком для картирования подобных зон.

Физическая природа удельного электрического сопротивления в значительной мере определяет и характер выдержанности сопротивлений тех или иных пород в пределах исследуемого участка. К примеру, глинистые породы (глины, мергели, суглинки и т. п.), характеризующиеся повышенной пористостью и сравнительно небольшим ее изменением по площади (особенно при изучении небольших участков), а также относительной стабильностью фильтрационных свойств, обладают достаточно низкими сопротивлениями (первые десятки омметров) и наибольшим относительно других пород постоянством сопротивлений. В то же время породы, обладающие хорошей фильтрационной способностью (пески, галечники, выветрелые известняки и др.) являются наиболее изменчивыми по сопротивлению, величина которого, вследствие разной степени их водонасыщения и минерализации вод, может колебаться в значительных пределах (до нескольких порядков). Подобная дополнительная информация позволяет выбирать горизонты-реперы при осуществлении стабилизации решений. При комплексировании электроразведки с другими геофизическими методами необходимо учитывать, что минерализация вод, существенно влияющая на электрическое сопротивление, практически не сказывается на упругих свойствах и плотности пород.

Разумеется, что при выявлении пространственного изменения электрического сопротивления горизонта, необходимо иметь уверенность в отсутствии влияния других факторов (приповерхностных неоднородностей, боковых экранных эффектов пород, геоморфологических особенностей рельефа, техногенных помех и т. п.), выявление и устранение влияния которых входит в обязательный этап интерпретационного процесса (см. раздел 2.4).

Основной дополнительной количественной информацией при отождествлении электроразведочных материалов с геологическими комплексами пород — осуществлении стратиграфической (либо литологи-

ческой) привязки выделенных электрических горизонтов, определении их сопротивлений и мощностей — являются параметрические данные, получаемые по результатам бурения, электрического каротажа, вскрышных работ и естественных обнажений (шурфы, карьеры, обрывы и т. п.). Следует отметить, что электрические сопротивления пород, получаемые в результате лабораторных измерений и изучения электрических свойств приповерхностных обнажений, в силу того, что пористость и влагосодержание, минерализация и др. могут значительно отличаться от соответствующих значений, отвечающих условиям естественного залегания пород. Наибольшую ценность, в этом смысле, представляют данные электрического каротажа и результаты бурения скважин, являющиеся основным критерием достоверности результатов электроразведки. Они позволяют наиболее надежно установить соответствие электрических характеристик разреза с геологической колонкой, осуществлять его детальный анализ, изучать особенности проявления различных пачек пород на кривой зондирования, оценивать возможность и целесообразность применения электроразведки для решения тех или иных задач в данных геоэлектрических условиях.

Анализ параметрического материала может проводиться с использованием различных приемов. При наличии достаточно полной параметрической информации — геологической колонки, диаграммы электрического каротажа — возможно моделирование электрического зондирования. Исходными данными для этого служат результаты детальной обработки диаграмм электрического каротажа с определением мощностей и электрических сопротивлений всех пропластков, слагающих разрез. Процесс моделирования включает расчет так называемой синтетической кривой зондирования по результатам обработки каротажа (решение прямой задачи) и ее количественную интерпретацию (решение обратной задачи) при различных вариантах задания исходных данных и формирования интерпретационных моделей сред [Колесников, 1981]. Вычисляемая по данным электрического каротажа синтетическая кривая зондирования в общем случае является наиболее точной математической моделью экспериментальной кривой зондирования. Это, в принципе, дает возможность для проведения достаточно объективного и обоснованного совместного анализа электроразведочных и геологических данных.

Однако практическая реализация данного процесса сталкивается с необходимостью учета ряда особенностей. Отметим основные из них.

Во-первых, согласно парадоксу анизотропии (см. раздел 1.5) замеры в кважинах позволяют определять лишь продольные сопротивления, которые к тому же осложнены погрешностями условий наблюдения (влиянием скважины). Во-вторых, расчет теоретических кривых производится без учета собственной анизотропии (микроанизотропии) пластов, величину которой по каротажной диаграмме определить невозможно [Пылаев, 1968].

Оценим расхождения между теоретической и параметрической кривыми ВЭЗ, обусловленные отмеченными этими факторами.

Пусть по данным каротажа выявлен n -слойный разрез, причем каждый из пластов (или ряд) обладает, кроме того, собственной анизотропией. Тогда, учитывая вышесказанное, точка анизотропии A_c (точка пересечения линий S и T) теоретической кривой для этого n -слойного разреза (рис. 2.16) будет определяться параметрами:

$$S_c = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_i} = d \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_{m,i}};$$

$$T_c = \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \rho_i = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \rho_{m,i},$$

где d — обобщенный для разреза коэффициент несоответствия значений сопротивлений, наблюдаемых по каротажу и по ВЭЗ; ρ_i — сопротивление i -го слоя, снимаемого с каротажной диаграммы; ρ_{mi} — среднее квадратичное сопротивление i -слоя.

С другой стороны, наблюдаемая кривая ВЭЗ для этого разреза будет иметь точку анизотропии A_n , определяемую параметрами:

$$S_n = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_{t,i}} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_{m,i} / \lambda_{\mu,i}} = \lambda_{\mu} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\rho_{m,i}};$$

$$T_n = \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \rho_{t,i} = \lambda_{\mu} \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \rho_{m,i},$$

где $\rho_{t,i}$, $\rho_{m,i}$ — соответственно продольное и поперечное сопротивление i -го слоя; λ_{μ} — обобщенный коэффициент микроанизотропии надпорной толщи пород.

Отсюда значения обобщенных параметров среды для теоретической и параметрической кривых зондирования будут связаны между собой следующими соотношениями:

$$S_c = \frac{d}{\lambda_\mu} S_H;$$

$$T_c = \frac{1}{d \cdot \lambda_\mu} T_H,$$

где коэффициенты d и λ_μ характеризуют соответственно величину вертикального и горизонтального смещений на бислогарифмическом бланке синтетической кривой зондирования относительно наблюдаемой. Можно показать, что при расчете теоретической кривой зондирования без учета свойств микро- и макроанизотропии смещение точки анизотропии по горизонтали будет соответствовать общему среднему коэффициенту анизотропии среды

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_\mu \lambda_M,$$

где λ_M — обобщенный коэффициент макроанизотропии надпорной толщи, вычисляемый по формуле (1.131).

Таким образом, по величине и характеру смещения теоретической кривой зондирования относительно параметрической можно оценить как влияние скважины, так и анизотропные свойства среды, не учтенные при расчете синтетической кривой ВЭЗ, и соответственно достоверность последующего анализа этой кривой.

Другой подход к анализу параметрического материала основан на непосредственном сопоставлении результатов количественной интерпретации параметрического зондирования, (зондирования, выполненного вблизи от скважины) с геологической колонкой. Такой анализ позволяет в явном виде оценить степень адекватности электроразведочных и геологических материалов и в интерактивном режиме рассмотреть варианты формирования интерпретационной модели с оценкой возможных пределов эквивалентности определения параметров слоев и значений их коэффициентов анизотропии.

При оценке коэффициента анизотропии необходимо учитывать пределы неоднозначности решения. В качестве критерия наличия анизотро-

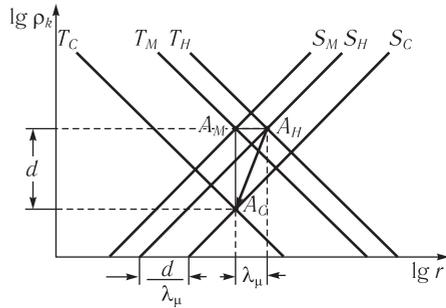


Рис. 2.16. Смещение точки анизотропии при расчете синтетической кривой электрического зондирования. A_c , A_n — соответственно точки анизотропии синтетической и наблюдаемой кривых ВЭЗ, A_a — точка анизотропии наблюдаемой кривой ВЭЗ без учета микроанизотропии пласта

пии можно считать условие, при котором верхний предел глубины залегания подошвы слоя превышает глубину залегания соответствующей ей геологической границы ($Z_{\min,i}^{\text{ВЭЗ}} >> Z_i^{\text{СКВ}}$). Интервал приближенных значений обобщенного коэффициента анизотропии λ_i в этом случае будет определяться соотношением $\tilde{\lambda}_i = \frac{h_{\min,i}^{\text{ВЭЗ}} + \Delta h_{\text{ЭКВ}}}{h_i^{\text{СКВ}}} = \lambda_{\min,i} + \Delta\lambda_i$, где

$\lambda_{\min,i} = \frac{h_{\min,i}^{\text{ВЭЗ}}}{h_i^{\text{СКВ}}}$ — минимальное значение коэффициента анизотропии

i -го слоя; $\Delta\lambda_i = \frac{\Delta h_{\text{ЭКВ}}}{h_i^{\text{СКВ}}}$ — приблизительная невязка, определяемая пределами неоднозначности определения мощности i -го слоя. В случае, если $Z_{\min,i}^{\text{ВЭЗ}} \leq Z_i^{\text{СКВ}}$, величину λ_i можно считать равной единице с точностью до пределов эквивалентности.

Один из примеров количественной интерпретации параметрического зондирования (см. рис. 3.7, *a* на вкладке), выполняемой в интерактивном режиме с помощью специальной программы, иллюстрирует возможность литологической привязки границ и определения основных параметров обобщенных слоев в рамках пределов эквивалентных решений.

Таким образом, в результате анализа параметрического зондирования дополнительная геологическая информация, по сути, представляется в виде геоэлектрической колонки, содержащей сведения о мощностях, сопротивлениях, коэффициентах анизотропии геоэлектрических горизонтов, отождествленных с конкретными пачками пород. Все эти данные могут быть использованы в качестве опорных количественных параметров при интерпретации площадных съемок ВЭЗ.

При интерпретации результатов площадных наблюдений весьма важной является также и информация об особенностях пространственного изменения пород. Очевидно, что наличие нескольких параметрических точек на исследуемом участке позволяет сузить пределы неоднозначности построения исследуемой геоэлектрической модели среды, так как ограничивает число возможных вариантов расчленения разреза, в наибольшей степени отвечающих геологической содержательности каждой из совокупности имеющихся скважин и возможным эквивалентным физическим решениям.

В общем случае, учитывая недоопределенность постановки задачи, неоднозначность выделения числа слоев в каждой точке зондирования и

определения их параметров, наличие целого ряда факторов, способных оказывать влияние на конечный результат, а также обычно достаточно большой объем обрабатываемой информации, процедура выбора оптимальной модели требует разработки специальных, достаточно технологичных приемов использования дополнительной информации, обеспечивающей повышение достоверности определения параметров модели среды и компьютерных способов организации интерактивного диалога на уровне «модель — поле».

Общая структура алгоритма геологического истолкования предполагает оптимизацию параметров физической модели среды в рамках эквивалентных решений в соответствии с некоторыми дополнительными требованиями, учитывающими результаты анализа параметрического материала и особенности пространственного изменения свойств среды (например, требование максимальной гладкости границ, ограничения пределов изменения удельного электрического сопротивления и т. п.). Такое пространственно согласованное построение модели, отвечающей геологическим представлениям о разрезе, может рассматриваться как задача выбора наиболее вероятной геологической гипотезы строения среды в рамках возможных физических решений.

Можно выделить несколько путей ее реализации, включая как детерминированные, так и статистические способы решения. В статистическом варианте построение геоэлектрической модели может быть сведено к задаче распознавания образов на основе принципов самообучения [Колесников, 1981 и др.]. Общий подход к решению таких задач заключается в определении тем или иным способом некоторого начального набора эталонных объектов, оценки их статистических характеристик и последовательного уточнения его на основе полученной статистической информации. Применение его дает возможность по совокупности ряда признаков (коэффициентам прослеживаемости, взаимной корреляции и др.) разделить элементы расчленения разреза на слои, проявления локальных объектов и помех. Однако в условиях практического применения ввиду неопределенности задания ряда критериев принятия решения, связанной с недостаточным объемом дополнительной информации, результат его применения не обеспечивает необходимой степени вероятности определения природы элементов расчленения разреза. К тому же возникают проблемы визуализации площадного изменения свойств среды, связанные с возможным образованием разрывного характера прослеживаемости геоэлектрических границ.

В методическом и технологическом плане более приближенным к практически приемлемому варианту оказался способ истолкования физических решений, основанный на проверке гипотез, связанных с выделением квазигоризонтально-слоистой модели среды (нормальной части разреза) с последующим выделением фрагментов поля, не укладывающихся в рамки этой модели. В качестве дополнительной информации помимо параметрических данных возможно использование качественных представлений о характере изменения физических свойств среды в виде некоторых управляющих параметров (предельных градиентов изменения глубины залегания границ и электрических сопротивлений, вероятного количества геоэлектрических горизонтов и их выдержанности и др.) и апостериорной информации, получаемой в результате совместного статистического анализа совокупности решений.

Признаками решений, отвечающих квазигоризонтально-слоистой модели, могут служить пространственная согласованность прослеживания границ и сопротивлений слоев в рамках пороговых значений, подбираемых с помощью управляющих параметров, хорошая сопоставимость наблюдаемого и расчетного для интерпретационной модели полей. Наиболее рациональной в технологическом плане оказалась методика построения обобщенной модели в рамках фиксированного числа слоев, подбираемого в интерактивном режиме «модель — поле» с использованием результатов анализа имеющихся параметрических зондирований. При такой методике задача геологического этапа интерпретации может рассматриваться как задача выделения регулярной части разреза, отображающей изменение электрических свойств конкретных литологических комплексов пород. Визуальный анализ характера пространственного изменения свойств пород (геоэлектрических разрезов, карт удельных сопротивлений по разным геоэлектрическим горизонтам, объемных отображений) совместно с полем остаточных аномалий, характеризующим степень соответствия решения модели квазигоризонтально-слоистой модели среды, позволяют получать информацию об исследуемой модели среды и делать предположительные заключения о наличии тех или иных особенностей разреза (изменений литологического состава, степени обводненности, наличии зон замещения, тектонических нарушений, влияния помех и т. п.). На этом этапе возможна оптимизация поведения границ на основе их сглаживания в пределах δ -эквивалентности. Более подробно реализация данного подхода будет рассмотрена в следующей главе.

2.8. Математическое моделирование электрических полей

Одним из инструментов анализа результатов геофизических наблюдений является моделирование изучаемых полей. Оно используется для обоснования достоверности геофизических заключений, выбора наиболее эффективных методик производства работ, оценки влияния на результаты измерений различных геологических и техногенных объектов и т. п. Наряду с физическим и аналоговым методами, при решении электроразведочных задач все более широкое развитие и применение получают аналитические и численные методы математического моделирования электрических полей [Дмитриев и др. 1973, 1985, 1990; Deу, Mogrison, 1979; Жданов и др., 1990; Жданов, Спичак, 1984, 1989; Ильин, 1985; Хмелевской и др. 1988, 1994; Модин и др. 1992; Кусков, 1985; Табаровский и др., 1975, 1989; Серебренникова 1987; Шкабарня и др., 1985, 1990; Кризский, Заваруева, 1997; Sato, 2000; Xiaoping, 2003; Соловейчик и др., 2004].

Строгие аналитические решения прямых задач, ввиду сложности математической реализации, к настоящему времени получены лишь для сравнительно простых физико-геологических моделей: шара, сфероида в однородном пространстве [Израильский, Шкабарня, 1984 и др.], полусферы на границе раздела «земля — воздух» [Заборовский, 1936], горизонтально-слоистой модели [Заборовский, 1963 и др.], вертикального и наклонных контактов, клиновидных структур [Скальская, 1948; Сахарников, 1966; Шкабарня и др., 1985, 1990]. Расчет поля сводится обычно к решению уравнения Лапласа при заданных граничных условиях. Основным методом расчета электрических полей является метод разделения переменных (метод Фурье), позволяющий свести решение к системе дифференциальных уравнений, имеющих аналитическое решение (см., в частности, раздел 1.6).

В случае сложнопостроенных двух- и трехмерных моделей сред, недоступных аналитическим методам, для осуществления моделирования привлекаются различные численные методы расчета полей, наибольшее применение из которых получили метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод интегральных уравнений (МИУ) и некоторые их комбинации.

Общим элементом для численных методов является дискретизация задачи и сведение ее к решению системы линейных алгебраических уравнений. Процедура дискретизации связана с представлением области

моделирования в виде равномерной сетки (МКР), либо разбиением ее на некоторые элементы (МКР). Степень дискретизации зависит от сложности модели и необходимой точности расчета электрического поля. Система линейных уравнений при этом может достигать нескольких десятков тысяч уравнений, что требует применения достаточно мощных ЭВМ и создает определенные сложности использования их при решении обратных задач.

В отличие от МКР и МКЭ, при использовании метода интегральных уравнений (МИУ) [Дмитриев и др., 1990; Жданов и др., 1990; Захаров, Ильин, 1970; Таборовский, 1975 и др.] дискретизации подвергается не вся область, а лишь поверхность однородного по сопротивлению тела, погруженного во вмещающую среду, для которой известно аналитическое решение прямой задачи. Результирующее электрическое поле рассматривается как сумма нормального, создаваемого вмещающей средой, и аномального, обусловленного локальной неоднородностью, полей. В качестве источников аномального поля используются мнимые заряды, индуцированные в местах нарушения однородности среды. Такой подход позволяет значительно сократить размерность систем уравнений и снизить вычислительные затраты, что создает принципиальные возможности использования его при решении обратных задач. К недостаткам метода можно отнести сложность его реализации относительно вышеотмеченных методов и ограниченность применения, определяемую ограниченным типом используемых моделей сред.

Наиболее простым и универсальным в этом смысле является метод конечных разностей. Разработке и реализации способов численного моделирования на основе его в электроразведке постоянным током посвящен ряд работ [Dey, Morrison, 1979; Варенцов, 1983; Кусков, Яковлев, 1988; Xiaoring, 2003 и др.]. Рассмотрим один из вариантов его реализации для расчета стационарных электрических полей в случае трехмерных моделей сред [Кутин, Колесников, 1999].

Пусть задана трехмерная область V с переменным значением электропроводности $\sigma(x, y, z)$, ограниченная некоторой поверхностью Γ . Для удобства решения задачи выберем форму этой области в виде прямоугольного параллелепипеда, верхнюю грань которого будем отождествлять с границей раздела земля — воздух. В произвольной точке этого пространства $A(x_A, y_A, z_A)$ находится точечный источник поля, с которого стекает электрический ток силы I (рис. 2.17). Требуется определить значение и распределение потенциала элек-

трического поля (либо кажущегося сопротивления) в пределах заданной области.

Уравнение для вычисления потенциала электрического поля в области, содержащей сторонний источник, может быть получено из четвертого уравнения Максвелла (1.4) при $D(t) = \text{const}$ и $j_{\text{ст}} \neq 0$. Взяв дивергенцию от правой и левой частей уравнения (1.4) и используя закон Ома, находим

$$\text{div}(\sigma \nabla U) = -\text{div} j_{\text{ст}}.$$

$\sigma = \sigma(\vec{r})$ — удельная проводимость среды; $\vec{r} = \vec{x}_i + \vec{y}_j + \vec{z}_k$ — радиус-вектор точки поля; $|\vec{r}| = \sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2 + (z-z_A)^2}$;

$\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right)$ — оператор Гамильтона.

Для тока, стекающего с точечного источника в проводящую среду, можно записать

$$\text{div} j_{\text{ст}} = I \delta(r-r_A),$$

где $\delta(r-r_0)$ — функция Дирака; I — сила тока. Поэтому окончательное уравнение будет иметь следующий вид:

$$\text{div}(\sigma \nabla U) = -I \delta(r-r_A). \quad (2.81)$$

Учитывая сингулярность поля потенциала, для упрощения реализации численной схемы решение задачи будем искать непосредственно для функции кажущегося сопротивления $\rho_k(r)$, которую для удобства дальнейшего вывода обозначим ρ_k .

Связь потенциала с кажущимся сопротивлением для двухэлектродной установки АМ, согласно (1.57), выражается соотношением

$$U = \frac{I \cdot \rho_k}{2\pi r}. \quad (2.82)$$

Подставляя (2.82) в (2.81), для точек области V , не содержащих источник поля, получим

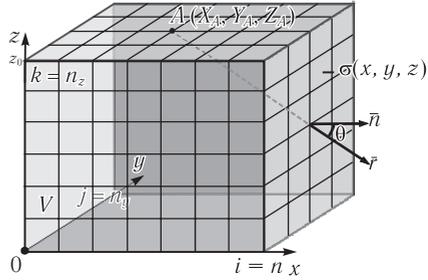


Рис. 2.17. К задаче численного моделирования методом конечных разностей

$$\operatorname{div}\left(\sigma\nabla\left(\frac{I\rho_k}{2\pi r}\right)\right)=0,$$

или

$$\operatorname{div}\left(\sigma\nabla(\rho_k/r)\right)=0.$$

Используя операции векторного анализа, последнее выражение приводится к виду

$$\begin{aligned} & \operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{r}\nabla\rho_k\right)+\operatorname{div}\left(\sigma\rho_k\nabla\left(\frac{1}{r}\right)\right)= \\ & =\operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{r}\nabla\rho_k\right)+\left(\nabla\frac{1}{r}\cdot\nabla(\sigma\rho_k)\right)+\sigma\rho_k\Delta\left(\frac{1}{r}\right)=0. \end{aligned} \quad (2.83)$$

Поскольку лапласиан потенциальной функции равен нулю (т. е. $\Delta(1/r)=0$), можем записать

$$\begin{aligned} & \operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial x}\right)+\operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial y}\right)+\operatorname{div}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial z}\right)- \\ & -\frac{(x-x_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial x}-\frac{(y-y_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial y}-\frac{(z-z_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial z}=0 \end{aligned}$$

или, в окончательном виде

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\sigma}{r}\frac{\partial\rho_k}{\partial z}\right)- \\ & -\frac{(x-x_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial x}-\frac{(y-y_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial y}-\frac{(z-z_A)}{r^3}\frac{\partial(\sigma\rho_k)}{\partial z}=0. \end{aligned} \quad (2.84)$$

Для получения единственного решения уравнения (2.84) зададим граничные условия.

Поскольку на границе с дневной поверхностью вертикальная составляющая плотности тока отсутствует (не происходит перетекания тока в верхнее непроводящее пространство), то

$$\left.\frac{\partial U}{\partial\vec{n}}\right|_{z=z_0}=0.$$

Выражая значения потенциала через ρ_k и выполняя процесс дифференцирования, получаем для $z = z_0$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \rho_k}{\partial \vec{n}} - \frac{\rho_k}{r^2} \cos \theta = 0$$

где θ — угол между \vec{r} и нормалью к поверхности \vec{n} .

При $z = z_0$ значение угла θ равно 90° и граничное условие для ρ_k упрощается до вида

$$\left. \frac{\partial \rho_k}{\partial z} \right|_{z=z_0} = 0.$$

Для поверхности, ограничивающей остальную часть выделенной области, воспользуемся граничным условием, учитывающим асимптотическое поведение поля на больших удалениях от источника [Тихонов, Самарский, 1977; Dey, Morrison, 1979; Хмелевской и др., 1988]:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial \vec{n}} + \frac{u}{r} \cos \theta = 0 \right|_r,$$

которое применительно к вычислению функции кажущегося сопротивления $\rho_k = \rho_k(r)$ переписывается в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\frac{\rho_k}{r} \right)}{\partial \vec{n}} + \frac{\rho_k}{r^2} \cos \theta &= \frac{1}{r} \frac{d \rho_k}{d \vec{n}} + \rho_k \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{\rho_k}{r^2} \cos \theta = \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial \rho_k}{\partial \vec{n}} + \rho_k \left(-\frac{1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial \vec{n}} \right) + \frac{\rho_k}{r^2} \cos \theta = 0. \end{aligned}$$

Или, учитывая, что

$$\frac{dr}{dn} = \cos \theta,$$

получаем

$$\left. \frac{\partial \rho_k}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0. \quad (2.85)$$

В точке положения источника (в точке сингулярности потенциала) будем полагать

$$\rho_k \Big|_{r=r_A} = \frac{1}{\sigma_A}.$$

Рассмотрим разностную схему численной реализации данной задачи. При решении уравнения (2.84) методом конечных разностей область V покрывается прямоугольной сеткой с координатами узлов:

$$\begin{aligned} x_i &= (i-1)\Delta x, & y_j &= (j-1)\Delta y; \\ z_i &= (k-1)\Delta z, & i &= 1, \dots, n_x; \\ j &= 1, \dots, n_y, & k &= 1, \dots, n_z. \end{aligned}$$

Точки $x_{i\pm 1/2} = x_i \pm \frac{\Delta x}{2}$, $y_{j\pm 1/2} = y_j \pm \frac{\Delta y}{2}$, $z_{i\pm 1/2} = z_i \pm \frac{\Delta z}{2}$, соответствуют полушагам этой сетки.

Для удобства численных выкладок в дальнейшем опустим индекс k у ρ_k . Слагаемые, входящие в дифференциальное уравнение (2.84), в разностном виде приобретут следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma}{r} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - \frac{(x-x_A)}{r^3} \frac{\partial(\sigma\rho)}{\partial x} = \\ & \frac{\sigma_{i+\frac{1}{2}jk}}{r_{i+\frac{1}{2}jk}} \frac{(\rho_{i+1jk} - \rho_{ijk})}{\Delta x} - \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2}jk}}{r_{i-\frac{1}{2}jk}} \frac{(\rho_{ijk} - \rho_{i-1jk})}{\Delta x} \\ & = \frac{\Delta x}{\Delta x} \frac{(x_i - x_A)}{r_{ijk}^3} \cdot \frac{\sigma_{i+1jk} \rho_{i+1jk} - \sigma_{i-1jk} \rho_{i-1jk}}{2\Delta x}; \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\sigma}{r} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) - \frac{(y-y_0)}{r^3} \frac{\partial(\sigma\rho)}{\partial y} = \\ & \frac{\sigma_{ij+\frac{1}{2}k}}{r_{ij+\frac{1}{2}k}} \frac{(\rho_{ij+1k} - \rho_{ijk})}{\Delta y} - \frac{\sigma_{ij-\frac{1}{2}k}}{r_{ij-\frac{1}{2}k}} \frac{(\rho_{ijk} - \rho_{ij-1k})}{\Delta y} \\ & = \frac{\Delta y}{\Delta y} \frac{(y_i - y_0)}{r_{ijk}^3} \cdot \frac{\sigma_{ij+1k} \rho_{ij+1k} - \sigma_{ij-1k} \rho_{ij-1k}}{2\Delta y}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma}{r} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) - \frac{(z - z_A)}{r^3} \frac{\partial(\sigma \rho)}{\partial z} = \\ = \frac{\sigma_{ijk+\frac{1}{2}} (\rho_{ijk+1} - \rho_{ijk})}{r_{ijk+\frac{1}{2}} \Delta z} - \frac{\sigma_{ijk-\frac{1}{2}} (\rho_{ijk} - \rho_{ijk-1})}{r_{ijk-\frac{1}{2}} \Delta z} - \\ - \frac{(z_i - z_A)}{r_{ijk}^3} \cdot \frac{\sigma_{ijk+1} \rho_{ijk+1} - \sigma_{ijk-1} \rho_{ijk-1}}{2\Delta z}; \end{aligned}$$

где

$$\sigma_{i\pm\frac{1}{2}jk} = \left(\sigma_{i+1jk} + \frac{\sigma_{ijk}}{2} \right),$$

$$\sigma_{ij+\frac{1}{2}k} = \left(\sigma_{ij+1k} + \frac{\sigma_{ijk}}{2} \right),$$

$$\sigma_{ijk\pm\frac{1}{2}} = \left(\sigma_{ijk+1} + \frac{\sigma_{ijk}}{2} \right)$$

$$r_{i\pm\frac{1}{2}jk} = \sqrt{\left(x_i \pm \frac{\Delta x}{2} - x_A \right)^2 + (y_i - y_A)^2 + (z_i - z_A)^2},$$

$$r_{ij\pm\frac{1}{2}k} = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + \left(y_i \pm \frac{\Delta y}{2} - y_A \right)^2 + (z_i - z_A)^2},$$

$$r_{ijk\pm\frac{1}{2}} = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2 + \left(z_i \pm \frac{\Delta z}{2} - z_A \right)^2}.$$

Складывая правые части равенств (2.86) и приравнивая результаты нулю, получим систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} c_{ijk} \rho_{ijk} + c_{i-1jk} \rho_{i-1jk} + c_{i+1jk} \rho_{i+1jk} + c_{ij-1k} \rho_{ij-1k} + \\ + c_{ij+1k} \rho_{ij+1k} + c_{ijk-1} \rho_{ijk-1} + c_{ijk+1} \rho_{ijk+1} = 0, \end{aligned} \quad (2.87)$$

где коэффициенты c_{ijk} при неизвестных ρ_{ijk} для внутренних точек области имеют вид:

$$\left. \begin{aligned}
c_{ijk} &= - \left[\begin{aligned}
&\frac{\sigma_{i+\frac{1}{2}jk}}{\Delta x^2 r_{i+\frac{1}{2}jk}} + \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2}jk}}{\Delta x^2 r_{i-\frac{1}{2}jk}} + \frac{\sigma_{ij+\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij+\frac{1}{2}k}} + \\
&+ \frac{\sigma_{ij-\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij-\frac{1}{2}k}} + \frac{\sigma_{ijk+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk+\frac{1}{2}}} + \frac{\sigma_{ijk-\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk-\frac{1}{2}}}
\end{aligned} \right]; \\
c_{i-1jk} &= \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2}jk}}{\Delta x^2 r_{i-\frac{1}{2}jk}} + \frac{(x_i - x_A)\sigma_{i-1jk}}{r_{ijk}^3 \Delta x}; \\
c_{i+1jk} &= \frac{\sigma_{i+\frac{1}{2}jk}}{\Delta x^2 r_{i+\frac{1}{2}jk}} - \frac{(x_i - x_A)\sigma_{i+1jk}}{r_{ijk}^3 \Delta x}; \\
c_{ij-1k} &= \frac{\sigma_{ij-\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij-\frac{1}{2}k}} + \frac{(y_i - y_A)\sigma_{ij-1k}}{r_{ijk}^3 \Delta y}; \\
c_{ij+1k} &= \frac{\sigma_{ij+\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij+\frac{1}{2}k}} - \frac{(y_i - y_A)\sigma_{ij+1k}}{r_{ijk}^3 \Delta y}; \\
c_{ijk-1} &= \frac{\sigma_{ijk-\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk-\frac{1}{2}}} + \frac{(z_i - z_A)\sigma_{ijk-1}}{r_{ijk}^3 \Delta z}; \\
c_{ijk+1} &= \frac{\sigma_{ijk+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk+\frac{1}{2}}} - \frac{(z_i - z_A)\sigma_{ijk+1}}{r_{ijk}^3 \Delta z}.
\end{aligned} \right\} \quad (2.88)$$

Значения коэффициентов c_{ijk} на границе области находятся с помощью граничного условия (2.85). Рассмотрим их определение на примере правой боковой грани $x_{nx} = (n_x - 1)\Delta x$, для которой это условие запишется в виде

$$\left. \frac{\partial \rho}{\partial \vec{n}} \right|_{x=n_x \Delta x} = \frac{\rho_{n_x+1jk} - \rho_{n_xjk}}{\Delta x} = 0.$$

Отсюда $\rho_{n_x+1jk} = \rho_{n_xjk}$.

Полагая $\sigma_{n_x+1jk} = \sigma_{n_xjk}$, при $i = n_x$ коэффициенты c_{ijk} и c_{i+1jk} в выражении (2.88) для этой грани будут определяться соотношениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{ijk} = - \left(\frac{(x_i - x_A)}{r_{ijk}^3 2\Delta x} + \frac{\sigma_{i-\frac{1}{2}jk}}{\Delta x^2 r_{i-\frac{1}{2}jk}} + \frac{\sigma_{ij+\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij+\frac{1}{2}k}} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_{ij-\frac{1}{2}k}}{\Delta y^2 r_{ij-\frac{1}{2}k}} + \frac{\sigma_{ijk+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk+\frac{1}{2}}} + \frac{\sigma_{ijk-\frac{1}{2}}}{\Delta z^2 r_{ijk-\frac{1}{2}}} \right) \\ c_{i+1jk} = 0. \end{array} \right.$$

Аналогичным образом вычисляются коэффициенты и для других граней области моделирования.

Реализованная на базе рассмотренной численной схемы программа предусматривает возможность расчета трехмерного поля для различных типов измерительных установок. Один из примеров численного моделирования, выполненного с целью изучения возможностей выделения локальных неоднородностей в условиях ведения подземных работ, приведен на рис. 2.18 (см. вклейку).

С помощью программы трехмерного моделирования можно получать не только информацию о пространственном поведении поля потенциала и кажущихся сопротивлений при различных измерительных установках и методик наблюдения, но и изучать возможности векторных способов измерений при определении пространственного положения локальных объектов, что особенно важно при производстве шахтных работ. Исходной информацией для этого могут служить трехкомпонентные векторные измерения поля $(\Delta U_x, \Delta U_y, \Delta U_z)$.

Одним из подходов к использованию векторных наблюдений при решении данной задачи является изучение поля вторичных источников, индуцированных на поверхности локальных тел [Игнатова и др. 1996]. Для раскрытия сути метода введем условное понятие вектора кажущегося сопротивления, под которым будем понимать вектор, модуль которого равен значению кажущегося сопротивления, а направление — совпадает с направлением измеряемой для его определения компоненты поля. Такое представление кажущегося сопротивления является, по сути, нормировкой модуля напряженности электрического поля, снижающей его зависимость от удаления точки наблюдения относительно источника и повышающей наглядность отображения свойств среды.

Аномальное поле — поле вторичных источников может быть получено путем вычитания из наблюдаемого поля, фоновой его составляющей, создаваемой первичным источником в однородной вмещающей среде:

$$\vec{\rho}_A = \vec{\rho}_\Pi - \vec{\rho}_\Phi,$$

где $\vec{\rho}_\Pi$ — полный вектор кажущегося сопротивления; $\vec{\rho}_\Phi$ — вектор фонового значения кажущегося сопротивления; $\vec{\rho}_A$ — вектор аномальных значений кажущегося сопротивления, обусловленный локальным включением.

Значения полного и фонового значений кажущегося сопротивления определяются по формулам:

$$\vec{\rho}_\Pi = \frac{2\pi}{I} \cdot \frac{\vec{\Delta u}}{|\vec{\Delta\phi}|} = \frac{2\pi}{I} \cdot \left(\frac{\Delta u_x}{|\vec{\Delta\phi}|}, \frac{\Delta u_y}{|\vec{\Delta\phi}|}, \frac{\Delta u_z}{|\vec{\Delta\phi}|} \right),$$

$$\vec{\rho}_\Phi = \frac{2\pi}{I} \cdot \frac{C \vec{\Delta\phi}}{|\vec{\Delta\phi}|} = \frac{2\pi}{I} \left(C \frac{\Delta\phi_x}{|\vec{\Delta\phi}|}, C \frac{\Delta\phi_y}{|\vec{\Delta\phi}|}, C \frac{\Delta\phi_z}{|\vec{\Delta\phi}|} \right),$$

где $\Delta\phi_x = 1/AN_x - 1/AM_x$, $\Delta\phi_y = 1/AN_y - 1/AM_y$, $\Delta\phi_z = 1/AN_z - 1/AM_z$; $|\Delta\phi| = \sqrt{\Delta\phi_x^2 + \Delta\phi_y^2 + \Delta\phi_z^2}$; AM_i, AN_i ($i = x, y, z$) — расстояния между питающим и приемными электродами; C — неизвестная постоянная, характеризующая постоянство электрических свойств среды в данной точке наблюдений по трем ортогональным направлениям.

В случае однородной вмещающей среды величина C находится из условия минимума следующего функционала:

$$\Phi(C) = \sum_{i=1}^N \frac{(\Delta u_{x_i} - C \Delta\phi_{x_i})^2 + (\Delta u_{y_i} - C \Delta\phi_{y_i})^2 + (\Delta u_{z_i} - C \Delta\phi_{z_i})^2}{\Delta\phi_{x_i}^2 + \Delta\phi_{y_i}^2 + \Delta\phi_{z_i}^2}.$$

Примеры численного моделирования векторного поля вторичных источников приведены на рис. 2.19 (см. вклейку).

Следует отметить, что способы векторного анализа находятся пока на стадии эксперимента, в котором численное моделирование играет определяющую роль в изучении различных подходов и методик их реализации.

Глава 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Создание эффективных методов интерпретации электроразведочных материалов в настоящее время немыслимо без использования компьютерных средств. Интенсификация производства, расширение сферы применимости различных методов и модификаций электрического зондирования, круга решаемых задач, потребность в оперативной, достоверной и геологически содержательной информации диктуют необходимость создания компьютерных технологий, максимально сочетающих мощные вычислительные, технические и сервисные возможности современных ПЭВМ с огромным теоретическим, методическим и экспериментальным багажом знаний, накопленным за многие десятилетия развития, совершенствования и практического применения данного метода.

Поиск таких технологий ведется как в направлении создания автоматизированных систем на основе традиционных подходов, базирующихся на применении непрерывно развивающегося широкого набора способов и средств качественной и количественной интерпретации, повышения однозначности получаемых результатов, методов распознавания природы выявляемых аномалий, выявления и снижения влияния различного рода помех [Хмелевской, и др., 1988, 1992; Шевнин, 1995; Колесников, 1981, 2002 и др.], так и по пути реализации иных подходов, нацеленных на создание высокотехнологичных систем сбора и анализа результатов наблюдений, на базе современных достижения в области техники, электроники и компьютеров. К таким системам относятся интенсивно разрабатываемые в последние годы за рубежом и отчасти в нашей стране, многоканальные аппаратурно-измерительные комплексы, реализующие томографические методики регистрации и обработки измеряемых величин [Barker, 1978; Griffiths, Turnbull, 1985; Loke, Barker, 1996; Barker, Moore, 1998; William et al., 2004; Бобачев и др., 1996].

Каждый из подходов имеет свои достоинства и недостатки, область и условия применения. Их развитие отображает естественный процесс поиска оптимальных решений общей проблемы.

В данной главе будет рассмотрена краткая история развития методов компьютерной интерпретации и один из вариантов построения автоматизированной системы обработки и интерпретации результатов зондирования.

3.1. Краткая история развития способов интерпретации электрических зондирований с применением ЭВМ

История формирования и развития методов компьютерной интерпретации данных электрического зондирования берет свое начало с момента появления первых электронных вычислительных машин и охватывает уже более чем сорокалетний период. За это время по данной теме опубликованы сотни научных работ, предложены и опробованы десятки алгоритмов и программ, реализующие различные способы решения данной задачи [Юкна, 1961; Валюс, Рудерман, 1972; Гудзь, 1972; Зиненберг, 1976; Матвеев, 1970, 1974; Шкабарня и др., 1964, 1965, 1971, 1986; Страхов, 1966; Изотова, Хореев, 1968; Израильский и др. 1986; Дианова, 1984; Абрамова, 1979; Колесников, 1981, 2002; Куфуд, 1984; Мыщик, 1984; Порохова и др. 1987; Пятин, 2003; Рыжов, Каринская, 1981; Шевнин, 1985, 1995; Модин и др. 1991, 2004; Бобачев и др. 1995, 1996, 2005; Koefoed, 1965, 1968; Kunetz, Rocroi, 1970; Onodera, 1970; Das, Verma, 1983; Ghosh, 1971a; Johansen, 1975, 1977; Lee, 1981; Marcuello, Queralt, 1987; Zohdy, 1975, 1989; Loke, Barker, 1995, 1996; Basokur, 1999; Taeyong, 2004; William et al., 2004 и др.], созданы программные комплексы, используемые в практике электроразведочных работ. Процесс совершенствования алгоритмов осуществляется в соответствии с непрерывным развитием теории и стремительным наращиванием вычислительных, сервисных и диалоговых возможностей ЭВМ, отображая общую тенденцию: от автоматизации отдельных вычислительных процедур к построению высокоавтоматизированных систем.

Большой теоретический вклад в создание методов компьютерной интерпретации внесли отечественные и зарубежные ученые: Л. Л. Ваньян, В. Н. Страхов, А. Н. Тихонов, В. И. Дмитриев, Б. К. Матвеев, Н. Г. Шкабарня, В. А. Шевнин, К. Vozoff, D. Ghosh, G. Kunetz, O. Koefoed.

Поиск эффективных методов решения обратных задач компьютерной интерпретации электрических зондирований шел в нескольких направлениях: исследовались различные приемы реализации метода подбора, изучались возможности использования функциональных и эвристических зависимостей для прямой инверсии наблюдаемых данных в параметры модели среды, а позднее и томографических систем наблюдений и обработки данных, анализировались варианты комбинаций различных подходов к решению данной задачи.

Первые опыты интерпретации результатов ВЭЗ методом подбора с помощью ЭВМ были выполнены канадским геофизиком К. Возофом

[Vozoff, 1958]. Для анализа использовалась не сама функция кажущегося сопротивления, а результат ее численного интегрирования — трансформанта $R(m)$, которая сравнительно просто связана с параметрами среды. Количество слоев и приближенные значения их параметров полагались известными.

Задача заключалась в последовательном уточнении приближенно заданных параметров путем минимизации невязки между экспериментальной и рассчитываемой для заданных параметров функциями $R(m)$. К. Возоф опробовал два известных способа минимизации функции в многомерном пространстве — градиентный метод наискорейшего спуска и метод функциональных итераций (последовательных приближений) или метод Ньютона.

Опыты проводились на серии трех- и четырехслойных кривых ВЭЗ и сразу выявили, по сути, все основные математические проблемы реализации алгоритмов данного направления. Результаты опробования показали, что оба способа не имеют гарантии единственности решения, так как минимизируемая функция невязки может иметь несколько минимумов. Кроме того, если один из параметров находится гораздо дальше от решения, чем другой, монотонный характер функции невязки резко нарушается, что сильно замедляет процесс сходимости. Результаты интерпретации существенно зависят от погрешностей в исходных данных и параметров начального приближения.

Последующие исследования функции невязки в окрестности решения показали, что поверхность этой функции имеет довольно сложный для минимизации «овражный» характер. Чувствительность ее к изменению параметров слоев различна и убывает с увеличением номера слоя. Это убывание немонотонно и существенно зависит от типа разреза и соотношения его параметров. В общем случае минимизируемая функция может иметь несколько экстремумов. Для подобных функций известные способы минимизации оказались малоэффективными. Достаточно полно проблемы минимизации освещены в работе [Яновская, Порохова, 1983].

Одной из основных причин неоднозначности результатов минимизации является фундаментальная проблема, связанная с некорректностью решения обратных задач [Тихонов, Арсенин, 1974].

Первая попытка интерпретации данных ВЭЗ с использованием метода регуляризации обратной задачи по А. Н. Тихонову была предпринята в работе [Зиненберг, 1976]. В разработанном им алгоритме минимизи-

руемый функционал помимо квадратичного отклонения между теоретической и измеренной кривыми зондирования включал возможность использования дополнительной информации в виде некоторых ограничений на искомые параметры модели среды (см. раздел 1.6). Эти исследования позднее были продолжены в работе [Мыщик, 1984], где были несколько расширены возможности использования различной дополнительной информации относительно накладываемых ограничений на искомое решение. Однако данный метод не получил дальнейшего развития в силу трудоемкости определения и некоторой неопределенности задания ограничений на искомые параметры при обработке больших массивов данных.

Один из способов повышения информативности метода подбора на основе использования вероятностных методов рассмотрен в работе [Порохова и др., 1987]. С помощью разработанного и реализованного способа было показано, что использование статистических методов позволяет получать важную информацию о величине и характере распределения погрешностей наблюдения, об относительной устойчивости параметров, диапазонах их эффективного проявления, наличия корреляционных связей между ними и др., повышающую математическую обусловленность процесса минимизации.

Из других работ, в которых рассмотрены нетрадиционные подходы к интерпретации методом подбора, можно отметить работы В. Н. Страхова [1976, 1980], в которых рассмотрена спектральная трактовка основных соотношений метода ВЭЗ и исследованы вопросы их устойчивости. В качестве одного из возможных вариантов повышения надежности и эффективности решения предложено использовать сравнение не по функции $\rho_k(r)$ для точечного источника поля, а по функции $\rho_k^{(2)}(r)$, полученной в результате ее пересчета для линейного источника наблюдаемого поля.

Появление персональных вычислительных машин со средствами графической визуализации открыло новые возможности в реализации способа подбора с использованием диалога «человек-ЭВМ», позволившей наиболее гибко сочетать большую вычислительную мощь ЭВМ с опытом и мастерством интерпретатора. Впервые это было выполнено в работе [Johansen, 1975]. Процесс интерпретации осуществлялся путем расчета теоретических кривых зондирования и сравнения их с экспериментальной кривой на экране дисплея. Для вычисления теоретических кривых $\rho_k(r)$ использовался метод линейной фильтрации, разработанный Д. Гхошем [Ghosh, 1971a, 1971b].

Дальнейшее развитие метода подбора было связано с разработкой алгоритмов количественной интерпретации для сложно построенных моделей сред на основе использования набора аналитических и численных методов решения прямых задач [Шкабарня, 1984, 1986; Модин и др., 1991; Шевнин, 1995].

Одной из первых наиболее значимых работ в этом направлении являлась работа [Шкабарня, 1984], в которой разработана и реализована методика аппроксимации реальной среды набором моделей, включающих наклонные и крутопадающие границы, клиновидные структуры и локальные объекты в однородной среде.

Методически процесс истолкования заключался в разделении площади на отдельные блоки, отличающиеся по своему строению и наиболее отвечающие одному из заданного набора модельных классов, с последующим определением их параметров. Решение задачи предполагало подготовку параметров начального приближения модели — размера блоков, наличия пологих, наклонных и крутопадающих границ, направления их простирания и возможных диапазонов изменения углов наклона, данных о топографии земной поверхности и другой априорной информации, получаемой, в частности, за счет использования различных приемов предварительного анализа наблюдаемых данных, расчета и построения теоретических кривых зондирования. Все это позволяло конструировать достаточно сложные геоэлектрические модели, отвечающие геологическим представлениям об исследуемом разрезе, но ввиду ограниченных в то время компьютерных возможностей было сопряжено с большими трудностями практической реализации.

Дальнейшее развитие это направление получило благодаря появившимся новым диалоговым возможностям ЭВМ и развитию методов решения прямых задач, в частности, метода интегральных уравнений. Возможность интерактивного подбора сложно построенных моделей была реализована с помощью использования программ математического моделирования электрических полей [Хмелевской, Шевнин и др., 1988, 1994]. Авторами были усовершенствованы и упрощены технологические моменты, связанные с заданием модели начального приближения и контролем решения, использованием специальных программ и графических средств визуализации. Для выбора и задания начальной модели, а также для контроля результатов привлекаются различные качественные представления наблюдаемых параметров поля (разрезы

кажущихся сопротивлений, нормированных производных и т. п.). В целях ускорения процесса интерактивного диалога была разработана и программа двумерного моделирования для линейных токовых источников поля, расположенных в крест профиля. С помощью данных программ проведено большое число расчетов, позволивших получить важные сведения об особенностях поведения электрических полей, характере и степени влияния на результаты зондирования различных искажающих факторов и др.

Из алгоритмов подбора, связанных с выделением локальных неоднородностей, можно отметить алгоритмы, реализующие различные варианты трансформации наблюдаемых данных. Процесс интерпретации обычно выполняется в два этапа [Мартышко, 1984; Изотова и др. 1984, 1987; Петров, Федоров, 1988]. На первом определяется наличие возмущающих тел в пространстве путем построения кажущихся центров возмущающих объектов по данным точечных зондирований и срединного градиента, либо путем подбора сингулярных источников (системы диполей), помещенных в заданную среду. На втором этапе ищется решение теоретической обратной задачи с целью построения поверхности аномального объекта.

Параллельно с развитием метода подбора разрабатывались способы и алгоритмы прямой численной интерпретации электрических зондирований.

Основной теоретической предпосылкой появления и развития численных методов послужило интегральное представление для потенциала, полученное румынским геофизиком Стефанеско [Stefanescu, Schlumberge, 1930]:

$$U(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \int_0^{\infty} B(m) J_0(mr) dm \right], \quad (3.1)$$

где $J_0(mr)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $B(m)$ — некоторая функция, зависящая от параметров среды (h_i , ρ_i) и переменной интегрирования m .

Возможность численного анализа функции $U(r)$ возникла как следствие теоремы о единственности решения обратной задачи ВЭЗ, впервые доказанной Р. Лангером в 1933 году. Доказательство выполнено не для самой функции $\rho_k(r)$, а для той части интеграла в уравнении (3.1), которая определяется электрическими свойствами среды — функции

$B(m)$ однозначно связанной как с функцией распределения потенциала, так и с параметрами среды. Эта особенность была подмечена Л. Сликтером [Slichter, 1933], который предложил разбить процедуру интерпретации на две части. Первая часть заключалась в получении подынтегральной функции, определяемой параметрами среды, а вторая — в определении параметров разреза с помощью анализа найденной функции.

Для получения подынтегральной функции Л. Сликтер впервые предложил использовать интегральное преобразование Ханкеля. Применяя это преобразование к уравнению (3.1), после несложных операций он получил следующее выражение:

$$R_1(m) = \int_0^{\infty} U(r) J_0(mr) dr, \quad (3.2)$$

где функция $R_1(m)$ связана с функцией $B(m)$ соотношением

$$R_1(m) = 1 + 2B(m).$$

Интеграл в формуле (3.2) вычислялся путем численного интегрирования.

Процесс получения параметров среды по функции $R_1(m)$, предложенный Л. Сликтером и Р. Лангером, был основан на предположении, что изменение сопротивления с глубиной имеет непрерывный, плавный характер. Искомая функция изменения сопротивления с глубиной $\rho(z)$ в этом случае может быть представлена степенным рядом, неизвестные коэффициенты которого находят с помощью коэффициентов функции $R_1(m)$, также выраженной степенным рядом.

Однако сложные алгебраические связи между коэффициентами обоих рядов делали метод крайне неудобным. Кроме того, при наличии в разрезе областей резкого изменения сопротивлений аппроксимация функции $\rho(z)$ степенным рядом была невозможной и метод становился не пригодным для интерпретации.

Обобщением метода Сликтера — Лангера на случай горизонтально-слоистых сред явился графоаналитический метод определения параметров разреза, разработанный К. Пекерисом [Pekeris, 1940]. Предложенный им способ анализа функции $R_1(m)$ положен в основу большинства всех последующих алгоритмов численной интерпретации. В современном аналитическом варианте этот способ рассмотрен в разделе 2.6.

Развитие теории численных методов послужило толчком для разработки алгоритмов численной интерпретации результатов ВЭЗ. Так, в 1965 г.

появилась работа [Шкабарня, Куничкина, 1965], а в 1966 г. — [Страхов, 1966], в которых были предложены алгоритмы аналитического решения обратной задачи электрического зондирования на основе способа последовательного «снятия слоев», усовершенствованного авторами, благодаря использованию для численного анализа выражений для функции $R_1(m)$, полученных Л. Л. Ваньяном. Оба алгоритма различались главным образом способом вычисления функции $R_1(m)$ из наблюдаемых значений кажущегося сопротивления. В первой работе для этой цели использован традиционный способ численного интегрирования. В работе В. Н. Страхова пересчет $\rho_k(r)$ в $R_1(m)$ осуществлялся с помощью более удобной для вычислений формулы, полученной путем преобразования связывающего их выражения к интегралу типа свертки.

Исследование способа и попытки создания на его основе эффективных алгоритмов решения обратной задачи [Шкабарня и др. 1965, 1971; Koefoed 1965, 1968; Романов (1969); Гудзь 1972, 1976; Матвеев, 1974; Колесников 1981 и др.] выявили ряд серьезных трудностей в его реализации. В частности, было неясно, как выбирать границы частотного диапазона m для определения параметров i -го слоя, что брать за точное решение в пределах выбранного диапазона, с какой точки осуществлять пересчет функции $R(m)$ на кровлю $(i + 1)$ -го слоя и др. Установлено, что погрешности, связанные с неопределенностью выбора этих значений, совместно с приближенностью вычислительных формул резко снижают устойчивость решения задачи. Погрешности интерпретации возрастают с увеличением номера слоя и существенно зависят от точности вычисления предыдущих параметров. Все это не позволяло достаточно эффективно использовать данный способ для автоматизации процесса интерпретации данных зондирования.

Разработкой алгоритмов и усовершенствованием способа «снятия слоев» в последующие годы занимались О. Koefoed, 1965, 1984; В. П. Колесников, 1981; Lee, 1981; Keceli, 1983; Vasokur, 1984, 1999 и др. Однако экспериментальные оценки показали ограниченные условия его применения, связанные с определенными требованиями к экспериментальному материалу и параметрам среды, сложностью введения априорной информации в процесс решения.

Из других работ, в которых использовался принцип прямого численного анализа кажущихся сопротивлений, следует отметить оригинальную работу Г. Кунца и Дж. Рокруа [Kunetz, Rocroi, 1970], в которой предлагалось определять искомые параметры среды с помощью некото-

рой функции, характеризующей распределение «мнимых» источников. Введение этой функции позволяло использовать для получения электрических характеристик среды хорошо разработанный в сейсморазведке математический аппарат определения коэффициентов отражений [Varanjiv V., Kunetz G., 1958].

Учитывая неоднозначность результатов, получение устойчивого решения осуществлялось с помощью кривой Дар-Заррук (DZ), количество и расположение основных точек перегиба которой выбиралось с учетом априорных представлений о разрезе (основные этапы реализации способа рассмотрены в разделе 2.6).

Попытка использования аппарата анализа сейсморазведочных данных для прямой интерпретации кривых зондирования в последующем предпринимались в работах [Szaraniec, 1982; Taeyong et. al. 2004].

Наряду с достаточно строгими способами количественной интерпретации, базирующимися на применении физико-математического аппарата решения прямых и обратных задач, предпринимались многочисленные попытки создания упрощенных способов количественной экспресс-интерпретации для определенных геоэлектрических условий, основанных на использовании различных эмпирических зависимостей между наблюдаемыми данными и параметрами среды [Zohdi, 1974, 1989; Дианова, 1984; Варламов, Лобанов, 1981; Колесников, 1990 и др.], успешно применявшиеся в практике электроразведочных работ.

Обобщение опыта реализации различных способов и подходов компьютерной интерпретации, теоретические наработки в области распознавания и подавления различного рода помех, полученные с помощью специально созданных программ численного моделирования, разработки в области визуализации различных видов получаемых материалов, привели к созданию в 90-е годы ряда пакетов программ, получивших большую востребованность на производстве и при организации учебного процесса [Хмелевской, и др., 1988, 1992; Шевнин, 1995; Бобачев, Горбунов, 2005; Рыжов, Каринская, 1981; Колесников, 1981, 2002 и др.]. Наиболее значительные результаты в создании таких программ и доведении их до широкого круга пользователей получены группой сотрудников лаборатории малоглубинной электроразведки кафедры геофизики МГУ [Модин и др., 2004]. Разработанная ими серия программ IPI включает необходимый набор методов и средств для

осуществления контроля данных, распознавания и снижения уровня помех, одномерной и двумерной интерпретации, визуализации получаемых материалов. В основу количественной интерпретации одиночных зондирований положен метод подбора с минимизацией невязки методом Зейделя. Помимо реализации традиционных методик, создана технология наблюдений и обработки, так называемых сплошных зондирований (СЭЗ), реализующая модификацию профильных многоканальных наблюдений, перспективную при проведении малоглубинных детальных исследований небольших участков.

Из зарубежных программ широкое применение получила программа, разработанная М. Х. Локе и Р. Д. Баркером [Loke, Barker, 1996], реализующая интерпретацию в рамках двумерной модели среды применительно к методике многоканальных наблюдений.

Таким образом, выполненный ретроспективный анализ развития различных способов и подходов показывает, что в области компьютерной интерпретации достигнуты весомые успехи, обеспечившие их уверенный выход в практику электроразведочных работ. Намечился переход от решения обратной задачи в рамках одиночных зондирований на новый уровень — совместного анализа совокупности зондирований, выполненных по профилю или площади. Одной из основных задач дальнейшего их развития, на пути создания высокоавтоматизированных систем количественной интерпретации, остается решение вопросов, связанных с разработкой эффективных способов доопределения обратной задачи на основе теории регуляризации, учитывающих информативность метода, особенности формирования геоэлектрических моделей и природы выделяемых аномалий.

Решению этой задачи способствуют накапливаемый опыт реализации различных подходов к регуляризации обратной задачи и стремительно развивающиеся современные вычислительные, графические и технические компьютерные средства, открывающие все более широкие интерпретационные возможности человеко-машинного диалога для организации эффективного и технологичного доопределения обратной задачи, распознавания природы выявляемых аномалий, оценки качества первичного материала, достоверности и геологической содержательности получаемых материалов.

Возможности практической реализации в этом направлении еще далеко не исчерпаны.

3.2. Интерпретация электрических зондирований с помощью системы программ ЗОНД

Рассматриваемая система программ реализует технологический процесс компьютерной интерпретации электрических зондирований, базирующийся на использовании теоретических, методических и методологических положений, рассмотренных в предыдущей главе. Она представляет собой своеобразный набор инструментов, необходимых для эффективного решения различного рода задач, освобождающих интерпретатора от множества рутинных операций и позволяющих более обоснованно подходить к решению вопросов, связанных с повышением однозначности и геологической содержательности получаемых результатов.

Совершенствование и развитие системы ориентировано на постепенное повышение степени автоматизации интерпретационного процесса по мере накопления практического опыта ее применения и развития теоретического обеспечения метода электрического зондирования.

Система включает следующие основные блоки: 1) ввод и контроль исходных данных; 2) обработку и анализ первичного материала; 3) качественную интерпретацию; 4) количественную интерпретацию; 5) анализ параметрических зондирований; 6) пересчет электрических параметров в другие физические характеристики среды на основе использования корреляционных связей.

Каждый из блоков автоматизирован и содержит специальный набор программ визуализации для оперативного и наглядного отображения обрабатываемых и результативных материалов в виде соответствующих графиков, разрезов, карт, объемных отображений, используемых как при изучении особенностей пространственного изменения свойств среды на этапе первичной обработки и качественной интерпретации, так и для организации интерактивного режима работы при выполнении количественной интерпретации.

Интерактивный режим работы обеспечивает возможность в условиях недоопределенности обратной задачи осуществлять выбор оптимального варианта построения исследуемой модели среды с помощью использования той или иной дополнительной информации о разрезе. Такой выбор может осуществляться как в традиционном варианте — анализ одиночных зондирований, так и на новом уровне — на этапе совместной автоматической интерпретации всей совокупности обрабатываемых зондирований по исследуемому участку. В качестве количественной дополнительной

информации используются данные бурения (либо электрического каротажа), представленные в виде обобщенных геоэлектрических слоев с помощью программы анализа параметрических зондирований.

Технологическая схема системы программ ЗОНД приведена на рис. 3.1. Рассмотрим кратко назначение и принципы работы основных ее блоков.

Исходными данными для интерпретации служат параметры измерительной установки, результаты полевых измерений (величина генерируемого тока, значение разности потенциалов приемной линии, координаты точки на местности и ее высотная отметка) для каждой из точек наблюдений исследуемого участка, а также дополнительная информация (при ее наличии) в виде данных бурения, каротажа и других параметрических данных. Ввод данных осуществляется в соответствии с выбранным пунктом меню путем заполнения соответствующих таблиц, отображенных на экране дисплея (рис. 3.2, *а*), либо импортированием их с других носителей информации, например, с блока хранения данных цифровой аппаратуры. Контроль ввода выполняется как в процессе набивки данных, сопровождающейся визуализацией кривой зондирования, так и с помощью специальной программы, контролирующей их соответствие требованиям программы ввода, наличие возможных ошибок набивки в текстовом и графическом виде (графики зондирования, схема расположения пикетов и др.).

Подготовка данных по скважинам также может осуществляться либо с экрана дисплея с использованием специальных процедур и библиотеки геологических символов (рис. 3.2, *б*), либо путем их импортирования из других баз данных. В качестве исходных данных по скважине используются возраст, литологический состав пород с их геологическим символом, уровень грунтовых вод, глубины залегания геоэлектрических границ; при наличии данных электрического каротажа — график изменения кажущегося сопротивления с глубиной. Результат подготовки данных по скважине представляется в виде геологической колонки, используемой в последующем при интерпретации параметрического зондирования и при построении и оформлении конечных результатов.

Блок первичной обработки включает устранение перекрытий сегментов кривой зондирования, полученных при разных размерах приемной линии (так называемых «ворот»), интерполяцию графиков зондирования с заданным шагом дискретизации, соответствующим фильтру,



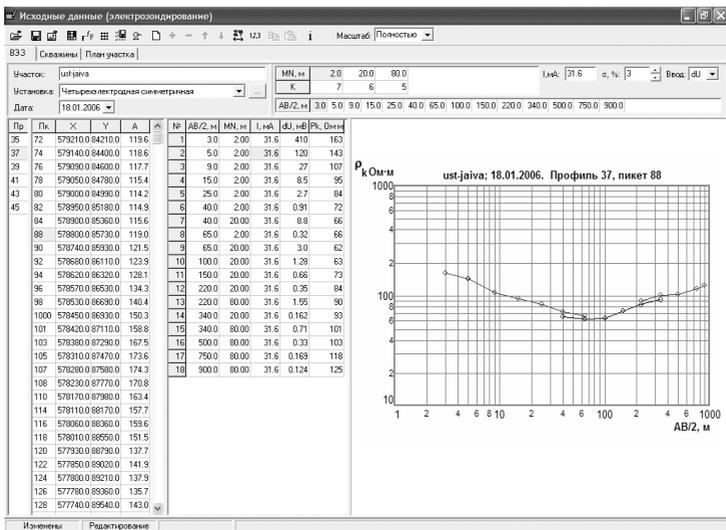
Рис. 3.1. Технологическая схема обработки и интерпретации электрических зондирований с помощью автоматизированной системы ЗОНД

используемому при вычислении теоретических кривых зондирования в процессе количественной интерпретации, а также, при необходимости, снижение влияния приповерхностных неоднородностей и сглаживание графиков зондирования в пределах погрешностей полевых наблюдений (см. разделы 1.6, 2.4). Для оценки качества первичного материала выполняется расчет и визуализация в виде графиков и карт аномальных значений «ворот», а также градиентов изменения кривых зондирования, контролируемых возможный выход измеренных значений за физически возможные пределы для квазигоризонтально-слоистых сред.

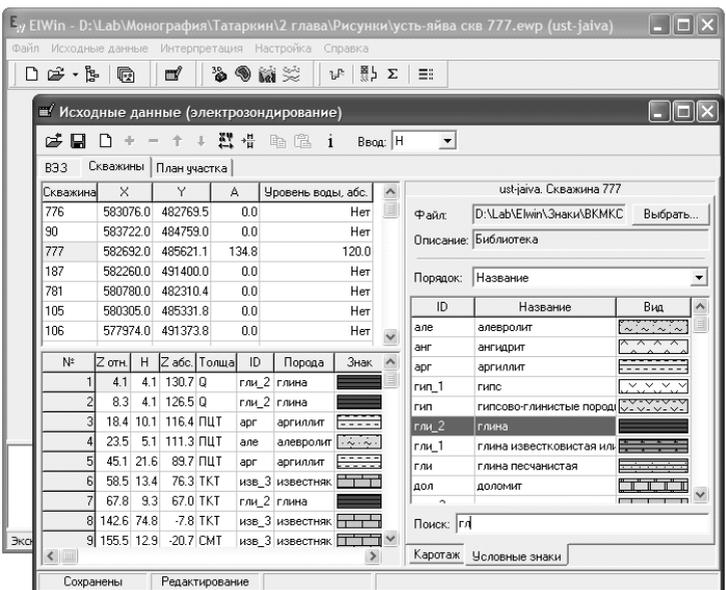
Блок качественной интерпретации позволяет осуществлять вычисление и визуализацию различных эффективных параметров — кажущихся сопротивлений, кажущихся проводимостей и их дифференциальных трансформант (вертикальной и горизонтальной производной, нормированных производных, полного нормированного градиента и др. (см. раздел 2.5)), выполнять объемное их отображение в разных проекциях с получением горизонтальных и вертикальных сечений анализируемого поля в виде разрезов, карт и произвольно заданных поверхностей, ограничивающих отдельные его фрагменты путем выбора соответствующего пункта меню (рис. 3.3, а).

Блок количественной интерпретации дает возможность выполнения следующих процедур (рис. 3.3, б): а) автоматическую интерпретацию с получением эквивалентных решений в рамках δ -эквивалентности с использованием приемов адаптационной регуляризации; б) интерактивную интерпретацию одиночных зондирований; в) формирование опорных решений по результатам интерпретации параметрических зондирований, а в случае их отсутствия — по результатам статистического анализа полученных в автоматическом режиме эквивалентных решений; г) интерактивную интерпретацию совокупности всех зондирований по исследуемому участку со стабилизацией решений на основе использования количественной (опорных решений) и качественной (сведений о гладкости границ и т. п.) дополнительной информации; д) контроль полученных результатов.

Для автоматической интерпретации одиночных зондирований использована комбинация аналитико-корреляционного способа с методом подбора, позволяющая получать эквивалентные решения, отвечающие погрешности полевых наблюдений, в ограниченных пределах, выявленных в результате математического моделирования (см. раздел 2.6).



a)



b)

Рис. 3.2. Пример подготовки исходных данных: результатов наблюдений методом электрического зондирования (а) и геологической информации (б)

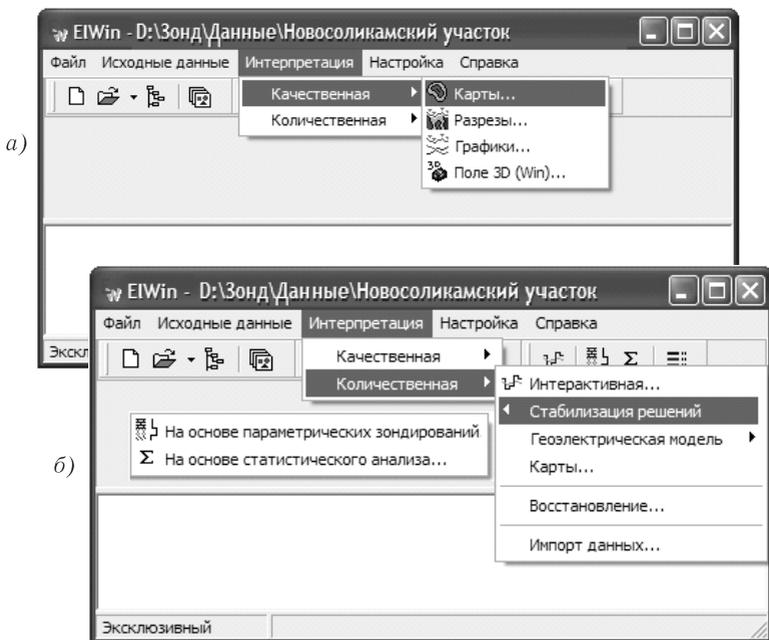


Рис. 3.3. Фрагменты меню системы ЗОНД

Интерактивный режим интерпретации одиночного зондирования предусматривает возможность оперативного получения эквивалентных решений, отличающихся числом слоев и их параметрами. В качестве вспомогательных средств при использовании данного способа для интерпретации профильных или площадных наблюдений предусмотрена возможность визуального сравнения результатов интерпретации анализируемого ВЭЗ с решением, полученным для любой другой точки зондирования, а также возможность использования этого режима в качестве начального приближения при автоматической интерпретации данного зондирования.

Режим автоматической интерпретации совокупности зондирований по исследуемому участку (режим «модель — поле») предусматривает, в целях повышения однозначности и достоверности результатов, необходимость формирования и использования опорных решений, аккумулирующих в себе априорную и апостериорную дополнительную количественную информацию об изучаемой модели среды. Для получения опор-

ных решений созданы специальные программы, предельно упрощающие данный процесс. Формирование опорных решений может выполняться как при наличии параметрического материала (результаты бурения, электрического каротажа и т. п.), так и при его отсутствии. В первом случае это реализуется с помощью программы анализа параметрических зондирований, расположенных вблизи скважины, во втором — путем выбора наиболее достоверных решений, полученных в режиме интерпретации одиночных зондирований.

По данным анализа параметрических зондирований в качестве опорного выбирается решение, наиболее согласующееся с геологическим разрезом в рамках δ -эквивалентности. При этом осуществляется геологическая (литологическая либо стратиграфическая) привязка границ, определяется положение опорного горизонта и оценивается коэффициент анизотропии слоистых пачек пород (см. раздел 2.7). Полученные данные служат в качестве основной дополнительной количественной информации для стабилизации результатов площадной интерпретации электрических зондирований.

Процесс стабилизации совместно с анализом параметрических зондирований, по сути, реализуют этап геологического истолкования электрических зондирований, выражающийся в увязке физико-математической модели с геологическим разрезом и наполнения ее геологическим содержанием. Вместе с тем стабилизация обеспечивает согласование решений для соседних точек зондирования за счет использования управляющих параметров, накладывающих ограничения на величину градиента возможного изменения параметров (глубин залегания границ и их сопротивлений). В процессе стабилизации последовательно находится ближайшая к опорной рядовая точка зондирования, для которой в качестве начального приближения берется опорное решение и выполняется его корректировка путем минимизации расхождения между сравниваемыми кривыми при заданных ограничениях на искомые параметры модели среды. Если результат минимизации отвечает заданным требованиям, полученное решение в рядовой точке берется в качестве исправленного и переходит в класс опорных.

В математическом отношении задачу можно представить в виде минимизации следующего функционала:

$$\delta(\rho_n, \rho_o) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\rho_{n,j} - \rho_{o,j}(h_i, \rho_i)}{\rho_{n,j}} \right)^2 = \min;$$

при условиях:

$$\delta \leq \delta_0; \quad \frac{\partial \rho_k(r)}{\partial P_i} > C_0; \quad \Delta z_i \leq \Delta z_0$$

где ρ_{nj} — наблюдаемая кривая $\tilde{\rho}_k(r)$ в j -й точке зондирования; $\rho_{o,j}(h_i, \rho_i)$ — кривая зондирования $\bar{\rho}_k(r)$ для опорного решения $(h_i, \rho_i; i = 1, n)$ в точке, ближайшей к j -му пикету; δ_0 — погрешность полевых наблюдений; $P_i = h_i, \rho_i; C_0 = f(\delta_0)$ — пороговое значение чувствительности функции $\rho_k(r)$ к изменению параметра слоя; Δz_0 — задаваемое в рамках квазигоризонтально-слоистой модели среды ограничение на значение градиента изменения глубины залегания границы слоя; N — количество разносов r .

Учитывая вероятность наличия нескольких эквивалентных вариантов формирования интерпретационной модели, технология количественной интерпретации в режиме «модель — поле» представляет итерационный процесс, выполняемый при участии интерпретатора. Работа интерпретатора сводится к заданию управляющих параметров, накладывающих ограничения на пространственное изменение физических параметров среды, и выбору наиболее оптимального варианта конструируемой физико-геологической модели.

Процесс стабилизации, при наличии данных бурения, начинается с выбора одного из параметрических зондирований, обладающего наиболее полной и достоверной информацией (назовем его активным опорным решением). Остальные параметрические зондирования и соответствующие им опорные решения используются в качестве контрольных на данном этапе.

После завершения стабилизации выполняется контроль и анализ полученных результатов путем оценки расхождения расчетного и наблюдаемого полей до и после стабилизации (с помощью карты остаточных аномалий) и сопоставления решений в контрольных точках зондирования. По результатам анализа контрольных решений отбирается то из них, для которого отмечается наибольшее расхождение между сравниваемыми величинами. Это контрольное решение переходит в класс активных и процесс стабилизации повторяется, но уже с использованием для доопределения задачи двух опорных зондирований и т. д. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будут исчерпаны все параметри-

ческие зондирования. Исправление решений в процессе стабилизации происходит с учетом области влияния скважины, определяемой по дистанционному принципу. В результате такого постепенного вовлечения априорных данных с контролем сходимости процесса получается дополнительная информация, позволяющая осуществлять прогнозную оценку точности и достоверности определения конечных параметров разреза.

В случае неудовлетворительных результатов, либо в целях проверки оптимальности полученного решения, интерпретация может повториться при других возможных эквивалентных вариантах формирования опорных решений.

Аналогичным образом осуществляется процесс автоматической интерпретации и при отсутствии параметрического материала. В этом случае в качестве опорных задаются решения, выбираемые интерпретатором по результатам количественного анализа одиночных зондирований. Для определения доверительных интервалов существования решения в этом случае привлекается оценка пределов эквивалентности, выполняемая отдельно для мощностей и сопротивлений слоев. Пределы эквивалентности для мощности произвольного (i -го) слоя находятся путем перебора ее значений с фиксированным шагом Δ по формуле $h_{i,\xi} = h_{i,0}(1 \pm \xi\Delta)$, где $h_{i,0}$ — начальное значение мощности, полученное в результате интерпретации; $\xi = 1, 2, \dots, N$. При каждом значении ξ параметры разреза подаются на вход программы минимизации расхождения наблюдаемой и расчетной кривых $\rho_k(r)$, осуществляющей минимизацию за счет изменения всех параметров разреза, кроме $h_{i,\xi}$. Получаемое на выходе программы значение невязки $\delta(\xi)$ сравнивается с погрешностью полевых наблюдений δ_0 . Если при очередном ξ величина $\delta(\xi)$ превысит δ_0 , то соответствующее ему значение $h_{i,\xi}$ принимается за нижний ($h_{i,\xi} = h_{i,0}(1 - \xi\Delta)$), либо верхний ($h_{i,\xi} = h_{i,0}(1 + \xi\Delta)$) предел возможных значений мощности i -го слоя. Пределы эквивалентности для сопротивлений слоев находятся по полученной выборке всех эквивалентных решений, полученных в процессе определения пределов эквивалентности для h_i .

По окончании процесса стабилизации возможна дальнейшая оптимизация модели за счет использования другой имеющейся информации, например, информации о гладкости границ. Уточнение решений в соответствии с этим требованием выполняется путем сглаживания геоэлектрических границ в рамках δ -эквивалентности. Математически задача сглаживания границ сводится к минимизации следующего функционала:

$$\Phi(z_i) = \sum_{j=1}^L \left(\frac{z_{ji} - \tilde{z}_{ji}}{\tilde{z}_{ji}} \right)^2 + \alpha \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial^2 z_{ij}}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z_{ij}}{\partial y^2} \right)^2 \right] dx dy, \quad i = 1, 2, \dots, n-1;$$

где L — количество зондирований на площади; n — число слоев; Z_{ij} — глубина залегания i -й границы в j -й точке зондирования; α — параметр сглаживания, подбираемый в соответствии с условием:

$$\left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \left(\frac{z_{ji} - \tilde{z}_{ji}}{\tilde{z}_{ji}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \sigma,$$

где σ — среднее относительное квадратичное отклонение, определяющее пределы вариаций сглаживаемого параметра.

В качестве оптимального берется максимальное значение σ , обеспечивающее выполнение условия

$$\left[\frac{1}{NL} \sum_{j=1}^L \sum_{\xi=1}^N \left(\frac{\rho_{k,ij} - \tilde{\rho}_{k,ij}}{\tilde{\rho}_{k,ij}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \delta_0,$$

где ρ_k и $\tilde{\rho}_k$ — соответственно расчетная и наблюдаемая кривые кажущегося сопротивления $\rho_k(r)$; N — число разносов питающей линии (r); δ_0 — погрешность полевых наблюдений.

Процесс сглаживания выполняется в интерактивном режиме путем варьирования величины σ с визуализацией геоэлектрического разреза и величины средней погрешности расхождения наблюдаемого и расчетного полей.

По окончании процесса интерпретации вычисляется поле остаточных аномалий, характеризующих степень соответствия расчетного и наблюдаемого полей в рамках используемой квазигоризонтально-слоистой модели среды. Значения остаточных аномалий, выраженные в процентах, рассчитываются по формуле

$$\Delta \rho_{k,ij} = \frac{\bar{\rho}_{k,ij}(r) - \tilde{\rho}_{k,ij}(r)}{\tilde{\rho}_{k,ij}(r)} \cdot 100\% ; \quad i = 1, L; \quad j = 1, N.$$

На участках с величиной $\Delta \rho_{k,ij}$, превышающей погрешность наблюдения (δ_0), может быть использовано 3D- либо 2D-моделирование для обоснования причин аномального поведения наблюдаемого поля.

Визуализация результатов количественной интерпретации осуществляется в виде геоэлектрических разрезов и карт удельных электрических сопротивлений по отдельным горизонтам. С помощью специальных процедур возможно редактирование полученных отображений — наложения геологической символикой, отображение геологических колонок в параметрических точках и т. п. Для изучения электрических характеристик интересующих обобщенных пачек пород, а также в целях комплексного анализа с другими физическими величинами, могут быть вычислены и визуализированы электрические сопротивления для любой интересующей части разреза в пределах глубины исследования.

В заключение хочется остановиться на некоторых вспомогательных элементах системы, определяющих ее технологичность и эффективность человеко-машинного диалога, в частности, графическом ее сопровождении.

Используемые приемы визуализации определяются существом решаемой задачи и природой отображаемых полей. Они включают как традиционные графические представления в виде одномерных (графики профилирования, наблюдаемые кривые зондирования и т. п.), двумерных (карты различных геоэлектрических характеристик, разрезы эффективных параметров по отдельным профилям и др.), так и нетрадиционные — трехмерные (объемные) представления параметров геоэлектрической модели среды, отображающих пространственное изменение электрических свойств, поведение геоэлектрических границ и других характеристик разреза.

Задача визуализации включает создание интерфейса и вспомогательных приемов, нацеленных на обеспечение оперативности, гибкости, наглядности и информативности истолкования электроразведочных наблюдений.

В системе ЗОНД реализовано два варианта программ визуализации. Первый из них создан на базе стандартных средств системы Турбо-Паскаль для операционной системы MS DOS. Второй — в среде программирования Delphi-7 с использованием стандартной библиотеки OpenGL, поставляемой в составе операционной системы Windows. Программы содержат специальные процедуры интерполяции и экстраполяции данных, использование аппарата аналитической геометрии и аксонометрии, операции настройки изображений и цветовой палитры, сервисные процедуры работы с изображениями. В общем случае задача визуализации двух- и трехмерных

изображений включает разработку способа аппроксимации дискретно заданной функции наблюдаемых значений $Z(x, y)$ на равномерную прямоугольную сеть и визуализацию полученной сеточной функции $Z_{ij}; i = 1, N_x, j = 1, N_y$ в различных ее проекциях с помощью построения изолиний с контурной цветовой заливкой. К настоящему времени в математике существует достаточно много способов интерполяции дискретно заданных функций. Однако формальное их использование, не учитывающее особенностей изучаемого поля, может приводить к появлению ложных аномалий и проявлениям различных эффектов, осложняющих процесс истолкования получаемых материалов. Выбор наиболее эффективного из них во многом определяется точностью и степенью дискретности задания исходного поля, характером его поведения и др.

В связи с этим, для снижения вероятности появления ложных аномалий при построении разрезов эффективных параметров при аппроксимации поля, использована линейная интерполяция с последующей процедурой контролируемого сглаживания с помощью трех- и пятиточечных фильтров.

Процедура сглаживания выполняется либо автоматически, либо пошагово в интерактивном режиме с визуальным контролем получаемого изображения и величины среднего квадратичного расхождения исходного и сглаженного полей.

Для построения двух и трехмерных изображений использован способ аппроксимации, учитывающий потенциальный характер отображаемых полей. Аппроксимация выполняется на основе решения квазигармонического уравнения [Аронов, 1977, 1990]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial y} \right) = 0,$$

где $1/r$ — функция расстояния от текущей точки до ближайшей наблюдаемой. В качестве краевого используется условие $\frac{dZ}{dn} = 0$.

Визуализация полученной в результате аппроксимации сеточной функции $Z_{ij}, i = N_x, j = N_y$ производится с помощью специально созданных процедур и средств графического интерфейса.

Разработанные способы и программы позволяют осуществлять визуализацию пространственного поведения различных физических параметров среды как в виде двумерных, так и трехмерных изображений. Программа

объемной визуализации реализует различные возможности визуального анализа исследуемого объекта, показанные на рис. 3.4 (см. вклейку): 1) построение трехмерного отображения результатов измерений согласно автоматически выбираемой либо заданной пользователем цветовой палитре с градиентной или контурной заливкой (рис. 3.4 *а, б*); 2) просмотр поведения поля внутри исследуемой области как в плоскости, ортогональной заданной координатной оси (рис. 3.4, *в*), так и по произвольно выбираемым сечениям (рис. 3.4 *г, д*); 3) вращение объемного изображения с помощью мыши либо клавиатуры вокруг вертикальной и горизонтальной оси; 4) построение трехмерных тел, ограниченных изоповерхностями («изотел»), с регулировкой прозрачности вмещающего их поля (рис. 3.4, *е*); 5) экспорт изображения в графические форматы BMP и JPEG.

Отдельные из примеров построения разрезов и карт приведены в иллюстрациях к тексту раздела 3.3.

Пакет программ ЗОНД реализован в двух вариантах: для операционной системы MS DOS [Кутин, Колесников, 1996] и для операционной системы семейства Windows (Windows 98 SE, Windows ME, Windows 2000 или Windows XP). Он имеет модульную структуру, то есть состоит из набора программ (модулей), реализованных в виде динамических библиотек и исполняемых файлов, управляемых ядром (оболочкой). Взаимодействие отдельных частей выполняется на основе СОМ-интерфейсов. Структура пакета является расширяемой, то есть имеет возможность замены и подключения дополнительных модулей, что позволяет осуществлять ее унификацию с целью обеспечения возможности подключения блоков обработки и интерпретации для других электроразведочных методов и их модификаций — профилирования, шахтных методов, электромагнитных методов зондирования и др. Для каждого обрабатываемого участка создается свой файл проекта, предназначенный для хранения исходных данных и результатов основных этапов обработки и интерпретации.

Для наиболее эффективной работы пакета рекомендуется компьютер с рабочей частотой процессора от 1,5 ГГц, объемом оперативной памяти от 512 Мб, объемом оперативной памяти видеокарты от 32 Мб.

3.3. Примеры компьютерной интерпретации

За последние годы накоплен достаточно большой опыт применения различных компьютерных программ и технологий при решении широкого круга производственных задач, охватывающий практически все сферы

применимости метода электрического зондирования. В частности, опыт использования программы ЗОНД включает: а) региональные исследования геологического разреза с целью решения задач обеспечения безопасного ведения шахтных работ; б) экологические исследования по изучению негативных последствий техногенного воздействия на геологическую среду нефте- и соледобывающих комплексов; в) интерпретации данных шахтной электроразведки; г) решение гидрогеологических задач, связанных с поисками подземных вод; и д) разнообразные инженерно-геологические исследования (проведение изысканий под строительство трубопроводов с целью выявления участков развития опасных геологических процессов — карстообразования, оползневых явлений, наличия таликовых зон, тектонических нарушений и др., изучения геоэлектрического разреза в местах переходов через водные преграды, исследования под строительство инженерных сооружений, изучение состояния пленочных экранов и резервуаров хранения жидких отходов и т. п.).

Использование компьютерных средств интерпретации в производственных условиях при решении столь разных по характеру и специфике задач позволяет выявить те или иные слабые стороны программ и дает важную информацию для их совершенствования и развития.

В данном разделе рассмотрен ряд примеров применения системы ЗОНД при интерпретации результатов электроразведочных работ.

3.3.1. Решение региональных геологоразведочных задач

В качестве примера рассмотрим результаты компьютерной переинтерпретации фондовых электроразведочных материалов, полученных в результате площадной съемки с целью изучения строения и физического состояния надсоляной толщи пород для обеспечения безопасной отработки месторождения калийных солей в связи с продвижением фронта шахтных работ.

Исследуемая площадь находится в Березниковском районе Пермского края в центральной части Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Размер ее составляет около 52 км².

Геологический разрез в исследуемом интервале глубин, составленный по результатам бурения скважин и литературным источникам [Кудряшов, 2001 и др.], представлен породами пермского и четвертичного возраста.

Четвертичные отложения сложены в основном глиной, суглинками, супесями, песками и галечниками, а в долинах рек и торфом. Мощность их колеблется от 1 до 25 м.

Нижезалегающие надсоляные отложения расчленяются на три толщи (сверху вниз): пестроцветную (ПЦТ), терригенно-карбонатную (ТКТ) и соляно-мергельную (СМТ).

В состав пестроцветной толщи (P_2u_{ss}) входят песчаники, алевролиты и аргиллиты с редкими маломощными прослоями известняков. Данная толща прослеживается не повсеместно. Мощность ее изменяется от 7 м до 170 м.

Терригенно-карбонатная толща (P_2u_{sl2}) сложена глинистыми и доломитовыми известняками, переходящими местами в мергели и содержащими прослой песчаников. Общая ее мощность колеблется в пределах от 72 м до 135 м.

Соляно-мергельная толща (P_2u_{sl1}) разбита на две части: верхнюю, несоляную часть, и нижнюю — переходную пачку. Несоляная часть представлена в основном мергелями, глинами, ангидритами и гипсами. Ее мощность составляет от 46 до 58 м. Переходная пачка (ПП) содержит чередующиеся слои мергеля и каменной соли (ритмопачки). Общее количество ритмопачек колеблется в пределах от 2 до 12. Иногда в ее разрезе встречается глина. Мощность переходной пачки меняется от 15 до 85 м. Залегающие ниже отложения покровной каменной соли (ПКС) имеют мощность порядка 20–25 м.

Далее по разрезу следуют породы карналлитовой и сильвинитовой пачек. Первая представлена красным карналлитом либо пестрым сильвинитом, в зонах замещения — каменной солью. Сильвинитовая пачка характеризуется развитием красных и полосчатых (вверху) сильвинитов, замещается каменной солью. Средняя мощность карналлитовой пачки около 80 м, сильвинитовой — 30 м.

Завершает соляную толщу пород подстилающая каменная соль, мощность которой колеблется от 90 до 450 м. В 20–30 м от кровли подстилающей соли выделяется пласт маркирующей глины (МГ).

В тектоническом отношении исследуемый участок расположен в центральной части южного блока ВКМКС в пределах двух тектонических структур. Восточная часть его занимает юго-западное крыло Березниковского поднятия, а западная и юго-западная лежат в Камском прогибе. Породы залегают относительно спокойно. Крыло Березниковского поднятия погружается на запад и юго-запад под углом от $1,5^\circ$ до $2,0^\circ$. По данным различных геофизических методов (гравиразведка, магниторазведка и др.) выделяются тектонические нарушения в осадочном чехле, в верхнепермских и более глубоких горизонтах.

Гидрографическая сеть района представлена р. Камой и ее левобережными притоками — реками Яйвой и Ленвой, питаемыми многочисленными ручьями и подземными водами. Пойма крупных рек местами сильно заболочена.

Гидростратиграфический разрез имеет четко выраженную этажность. С поверхности земли и до переходной зоны распространены водонесные горизонты и комплексы в четвертичных, пермских терригенных и карбонатных отложениях. Первый соляной слой соляно-мергельной толщи является региональным водоупором, верхняя часть которого сложена переслаивающимися терригенными отложениями со слоями каменной соли.

В надсоляном комплексе пермских отложений условно выделяются два водоносных горизонта, характеризующихся существенно разными статическими величинами водообильности трещин: терригенно-карбонатный (ТКВГ) и мергельный (МВГ). Величина модуля подземного стока характеризуется значениями $2,4 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$, а направление стока совпадает с направлением стока поверхностных вод. Наиболее значимые дрены надсолевого водоносного комплекса приурочены к ослабленным зонам, унаследованным реками Ленвой и Яйвой. Гидравлическая связь между водоносными горизонтами осуществляется преимущественно по крутопадающим трещинам и трещиноватым зонам. Минерализация подземных вод терригенно-карбонатного водоносного горизонта, залегающего в интервале глубин от +120 до -50 м, составляет 0,2–0,3 г/л, а мергельного водоносного горизонта, залегающего ниже абсолютной отметки -50 м, — до 300 г/л. Высокая минерализация подземных вод МВГ обусловлена процессами выщелачивания прослоев солей из низов соляно-мергельной толщи, а также покровных каменных солей.

Зона активного водообмена надсолевого комплекса фиксируется в долинах рек при пересечении ими положительных соленных структур. Зоны затрудненного водообмена формируются в отрицательных формах рельефа кровли водоупора перед пересечениями основными дренами положительных соляных структур. Мощность их достигает 28 м. Мощность зоны крепких рассолов превышает мощность зоны затрудненного водообмена на 10–60 м, и имеет максимальную величину (до 180 м) в долине р. Кама.

В морфологическом отношении поверхность участка представляет собой слабовсхолмленную равнину, прорезанную долинами выше ука-

занных рек. Северная, восточная и южные части участка представлены пологими или вытянутыми холмами с абсолютными отметками от +140 до +200 м. Глубина расчленения рельефа в среднем составляет 50–80 м. На отдельных участках встречаются районы с повышенной морфотрещиноватостью.

Электроразведочные работы на исследуемой территории включали региональные и детализационные наблюдения. Региональные наблюдения были выполнены по сети профилей субширотного направления. Расстояние между ними составляло 800–1500 м, а между точками наблюдения по профилю — 200–250 м, со сгущением на отдельных участках до 100 м. Детализационные наблюдения проводились на юго-восточной окраине участка с расстоянием между профилями 250–350 м, а между пикетами — 100–200 м. Всего было отработано 6 региональных и 4 детализационных профиля. Общее число физических точек наблюдения составило 315. Работы выполнены методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) симметричной четырехэлектродной установкой при величине шага приращения разносов питающей линии $p = r_{j+1}/r_j = 1,4-1,5$. Максимальный полуразнос питающей линии $r = AB/2$ при региональных наблюдениях составлял 900 м, при детализационных 750 м. Для поддержания измеряемой разности потенциалов в необходимых пределах в процессе выполнения зондирований использованы три приемных линии с длиной MN , равной 2, 20 и 100 м. Для уменьшения переходного сопротивления питающих электродов применялось группирование из пяти заземлителей.

Измерения проводились аппаратурой АНЧ-3, обладающей высокой помехозащищенностью, обусловленной использованием узкополосного кварцевого синхронного фильтра.

Оценка точности полевых измерений, выполненная в объеме 5 % от общего количества физических точек, показала удовлетворительное совпадение контрольных и контролируемых измерений. Средняя величина погрешности составила 4,2 %.

Анализ полевого материала показал, что наблюденные кривые зондирования по внешнему виду отражают трех-семислойный разрез с высокоомным опорным горизонтом. Значения кажущихся сопротивлений меняются в широком диапазоне: от первых единиц до нескольких тысяч Ом · м. Визуальный анализ полученных материалов с использованием вспомогательных характеристик — углов, характеризующих

градиенты изменения кривых кажущегося сопротивления $\alpha = \text{Arctg} \left(\ln(\rho_k(r_{j+1})/\rho_k(r_j)) / \ln(r_{j+1}/r_j) \right)$ (рис. 3.5, а, см. вклейку), смещений сегментов кривой зондирования, образующихся в результате изменения длины приемной линии

$$\Delta\rho = 2 \left[\ln(\rho_k(MN_{\xi+1})/\rho_k(MN_{\xi})) / \ln(\rho_k(MN_{\xi+1}) \cdot \rho_k(MN_{\xi})) \right] \cdot 100 \%$$

выявил ряд искажений, проявляющихся в наличии углов наклона асимптотических ветвей кривых зондирования значительно превышающих физически возможные пределы для квазигоризонтально-слоистых сред, достигающие $65-75^\circ$, и также встречающиеся достаточно большие (более 15 %) значения $\Delta\rho$ в интервале разносов $AB/2 = 220-350$ м.

Полученные карты α и $\Delta\rho$ показали, что данные виды искажений закономерно прослеживаются в пределах восточной и западной окраин исследуемой территории, и их наличие подтверждается результатами детализационных работ. Наиболее вероятной причиной повышенных значений $\Delta\rho$ является повышенная латеральная изменчивость свойств пород (см. раздел 2.4).

Среди причин, способных вызвать второй из выявленных видов искажения (искажений асимптотических ветвей кривых зондирования) в данных геологических условиях, при использованной частоте генерируемого тока (4,88 Гц) и методике полевых работ, могут служить помехи, связанные с переходными процессами, образующимися при пропускании генерируемых прямоугольных импульсов тока в заземленной питающей линии. Длительность процесса становления поля, определяемая соотношением $\tau = 1,98S \cdot (AB/2) \cdot 10^{-3}$ с (где AB — длина питающей линии в км), при наличии в разрезе объектов с высокой проводимостью и больших размерах AB может достигать первых десятков секунд, а возникающее вторичное поле, при этом, может вызывать завышение измеренных значений до 100 % и более [Ведринцев, 1980]. Объектами высокой проводимости в данном случае могут служить высокоминерализованные воды мергельного водоносного (рассольного) горизонта, имеющего на отдельных участках мощность более 100 м, а также области повышенного водообмена пород водозащитной толщи. Минерализация вод в данных условиях, достигающая 300–350 г/л, соответствует достаточно низким (до сотых долей омметра) значениям их сопротивлений [Кобранова, 1962]. Присутствие в разрезе таких низкоомных зон в силу влияния переходных процессов при работе с аппаратурой низкой частоты способно приводить

к неадекватному эффекту — чрезмерному завышению значений кажущегося сопротивления в области больших разносов питающей линии. Как правило, наличие этих зон в разрезе сопровождается резким понижением кажущегося сопротивления в интервале разносов питающей линии, соответствующих глубине залегания перекрывающих пород.

Из сказанного следует, что формальное использование традиционных методов интерпретации результатов зондирования, выполненных с аппаратурой низкой частоты в подобных геоэлектрических условиях, может приводить к заведомо неверным геологическим выводам. Оценка и контроль влияния переходных процессов в этих условиях должны быть обязательным элементом методик полевых наблюдений. Вместе с тем, учитывая связь данного вида искажений с искомыми объектами, отмеченный эффект может быть использован в качестве одного из поисковых критериев для выделения разуплотненных зон и картирования рассольного горизонта.

Информация, полученная в результате анализа первичного материала, является весьма полезной при выполнении качественной и количественной интерпретации.

Отдельные из результатов качественной интерпретации, отображающих общий характер пространственного изменения электрических свойств среды, приведены на рис. 3.5, б-г (см. вклейку). Анализ полученных материалов показывает, что диапазон изменения кажущихся сопротивлений в пределах исследуемой территории достаточно широк и составляет от 2 до 55000 Ом · м. Наиболее высокие сопротивления соответствуют приповерхностной части разреза до глубин, составляющих первые метры ($AB/2 = 4-6$ м). Значения сопротивлений этой части разреза для западной и центральной частей территории закономерно меняются от первых сотен до 5000 Ом · м, постепенно уменьшаясь в восточном направлении до 35–70 Ом · м.

С глубиной сопротивление пород заметно понижается и для большей части территории находится в пределах 15–80 Ом · м. Поле ρ_k фиксируют наличие ряда зон относительно пониженных сопротивлений, устойчиво прослеживаемых как по площади, так и на разных эффективных глубинах. Наиболее хорошо выраженная из них, с сопротивлением порядка 15–35 Ом · м, наблюдаемая в интервале разносов $AB/2 = 16-50$ м в восточной части территории, тянется в виде полосы шириной до 1–1,5 км вдоль р. Ленвы, затем эта зона меняет направление на северо-западное и пересекает практически всю территорию в центральной ее части в направлении Камского водохранилища (рис. 3.6, см. вклейку).

По мере дальнейшего погружения, область пониженных значений сопротивлений локализуется в виде зоны, расположенной в юго-восточной части территории. Наиболее низкие значения кажущихся сопротивлений (до первых единиц омметров) наблюдаются в районе восточного окончания профиля 39 (рис. 3.6, см. вклейку). Данная зона с глубиной несколько затухает, причиной чему служит отмеченное выше влияние переходных процессов, наиболее значительно проявляющихся на последних разностях питающей линии.

Результаты качественной интерпретации, раскрывая общие закономерности изменения электрических свойств среды, не позволяют с необходимой достоверностью оценить глубинность исследования, контрастность свойств пород, наличие и прослеживаемость геоэлектрических границ, минерализацию подземных вод в интересующих интервалах глубин и др. Для получения количественных характеристик геоэлектрического разреза и их геологического истолкования была выполнена количественная интерпретация со стабилизацией решений на основе использования результатов анализа параметрических зондирований.

В качестве параметрического материала для литологической привязки геоэлектрических границ, выделяемых по данным ВЭЗ, и геологического истолкования получаемых электроразведочных материалов использованы результаты бурения солеразведочных и структурных скважин. В пределах исследуемой территории отобрано 14 из них, находящихся на удалении от ближайших точек зондирования не более 500 м. Один из примеров такого анализа приведен на рис. 3.6, а (см. вклейку).

Сопоставление результатов количественной интерпретации параметрических ВЭЗ, расположенных вблизи скважин, с геологическими данными, полученными по результатам бурения, показало, что в результатах интерпретации находят отображение практически все основные комплексы пород, включая четвертичные отложения, ПЦТ, ТКТ, СМТ+ПП и покровные каменные соли.

Первые два-три геоэлектрических слоя характеризуют четвертичные породы, включающие отложения глин, суглинков, прослоев песчаника. Удельное электрическое сопротивление данной пачки меняется в зависимости от изменения состава пород и их влагонасыщенности от 28 до 7600 Ом · м. Общая мощность пачки составляет от 4 до 15 м.

Залегающие ниже верхнепермские отложения ПЦТ, представленные песчаником с прослоями аргиллита и алевролита, достаточно изменчивы по составу и количественному соотношению, что находит отраже-

ние в значениях удельного электрического сопротивления четвертого геоэлектрического слоя. В целом данная толща отображается пониженными сопротивлениями, меняющимися от 27 до 68 Ом · м. Верхняя геоэлектрическая граница горизонта, соответствующего данной толще, не имеет достаточно четкой стратиграфической и литологической привязки. Существенное влияние на ее формирование оказывает уровень грунтовых вод. В отдельных случаях, в частности, при отсутствии в разрезе отложений ПЦТ, низкоомный горизонт может включать в себя отложения верхней части терригенно-карбонатной толщи.

Пятый геоэлектрический слой, имеющий относительно повышенное сопротивление ($\rho = 80\text{--}160$ Ом · м), в целом хорошо отождествляется с отложениями ТКТ, представленной в основном известняком с прослоями песчаника и аргиллита. Судя по величине сопротивлений, известняки обладают повышенной трещиноватостью и обводненностью. Мощность слоя колеблется от 90 до 130 м.

Шестой геоэлектрический слой, отмечаемый пониженными значениями сопротивлений, характеризует отложения пород соляно-мергельной толщи. Данный слой относительно слабо проявляется на кривых зондирования, что затрудняет литологическую привязку нижней его границы. В зависимости от мощности соляных прослоев и их физического состояния, положение границы в разрезе может колебаться в пределах от поверхности переходной пачки до кровли покровных каменных солей. При этом средняя величина коэффициента анизотропии, полученная по величине отношения соответствующих мощностей слоев, определенных в результате интерпретации и по данным бурения, составляет порядка 1,2–1,3.

Седьмой геоэлектрический слой относительно повышенного сопротивления, являющийся опорным для данной территории, отождествляется с кровлей покровных каменных солей. Сопротивление его колеблется от 140 до 600 Ом · м. В отдельных случаях сопротивление данного слоя понижается до 80 Ом · м, что может свидетельствовать о наличии ослабленной зоны водозащитной толщи.

С помощью технологии, рассмотренной в разделе 3.2, были получены геоэлектрические разрезы по всем профилям исследуемой площади, отображающие строение и физическое состояние пород в пределах исследуемой территории. Один из примеров построения разреза приведен на рис. 3.6, б (см. вклейку).

В результате послойного анализа полученных материалов были составлены представления о пространственном изменении физических харак-

теристиках основных толщ пород. Установлено, что мощность четвертичных отложений в пределах территории колеблется от первых единиц до 30–35 м, а удельное электрическое сопротивление — примерно от 20 до 16000 Ом·м, указывая на повышенную неоднородность литологического состава и физического состояния пород. Карта электрических сопротивлений четвертичных отложений показала хорошо выраженную субширотную зональность, проявляющуюся в чередовании зон относительно повышенного (более тысячи Ом-метров) и пониженного ($\rho = 150\text{--}600$ Ом·м) сопротивлений, пересекающих практически всю исследуемую территорию в субмеридиональном направлении. Области низкоомных значений сопротивлений ($\rho = 17\text{--}100$ Ом·м) в соответствии с результатами анализа параметрических зондирований отождествлены с влагосодержащими глинисто-песчаными отложениями, а участки высоких сопротивлений — с необходимыми песчаными и песчано-гравийными отложениями.

Пестроцветная толща по данным интерпретации характеризуется относительно пониженными сопротивлениями ($\rho = 5\text{--}60$ Ом·м). Мощность ее меняется примерно от 9 до 105 м. В пределах ее выделяется несколько зон низких сопротивлений, одна из которых, начинающаяся от русла р. Лены, пересекает практически всю территорию в центральной ее части в направлении Камского водохранилища (рис. 3.7, а, см. вклейку).

Терригенно-карбонатная толща в пределах исследуемой территории имеет мощность порядка 65–140 м. Отмечена хорошо выраженная зональность свойств пород, проявляющаяся в чередовании участков относительно пониженного ($\rho = 80\text{--}150$ Ом·м) и повышенного ($\rho = 150\text{--}250$ Ом·м) сопротивлений, шириной от полутора до трех километров, пересекающих данную территорию в субмеридиональном направлении. Анализ параметрических зондирований и геоэлектрических разрезов показал, что наиболее вероятной причиной отмеченной выше зональности является частичное замещение состава пород, что отмечается нарушениями прослеживаемости границ, изменением стратиграфического их положения, появлением дополнительных геоэлектрических горизонтов в верхней части толщи. В юго-восточной части территории в пределах терригенно-карбонатной толщи выделена область аномально пониженных сопротивлений ($\rho = 8\text{--}20$ Ом·м), коррелирующаяся в плане с аналогичной зоной на карте электрических сопротивлений пестроцветной толщи.

В данном интервале глубин начинает проявляться ряд локальных аномалий высокого сопротивления ($\rho > 300$ Ом·м), природа которых по дан-

ным анализа первичного материала может быть связана с влиянием переходных процессов, значительно превышающих измеряемые значения поля.

Нижезалегающая соляно-мергельная толща имеет относительно пониженные значения сопротивлений. Величина и характер их площадного изменения отображает степень пористости, трещиноватости и насыщенности пород минерализованными подземными водами. Для основной части территории сопротивление пород составляет от 17 до 100 Ом · м. Мощность слоя по данным интерпретации (без учета коэффициента анизотропии) находится в пределах 105–145 м. Следует отметить, что ввиду слабовыраженного проявления на кривых зондирования данного слоя и, следовательно, повышенных пределов эквивалентности, точность определения его параметров может составлять первые десятки процентов. Впрочем, это в большей мере влияет на точность структурных построений, нежели на картирование возможных ослабленных зон, контрастность аномального проявления сопротивлений которых составляет в данном случае сотни процентов. Карта электрических сопротивлений данного слоя позволила выделить наличие двух основных зон относительно пониженного сопротивления, сопровождающихся интенсивными проявлениями влияния переходных процессов на примыкающих к ним участках. Отмечается коррелируемость пространственного положения этих зон с низкоомными участками вышележащей терригенно-карбонатной толщи.

Последний геоэлектрический горизонт, являющийся опорным для основной части данной территории, согласно результатам анализа параметрических зондирований, отображает электрические свойства и физическое состояние переходной пачки и верхней части покровных каменных солей. Электрическое сопротивление пород данной части разреза составляют порядка 100–250 Ом · м с повышением в юго-западной ее части до 500 Ом · м. Области относительно пониженных сопротивлений (50–80 Ом · м), связанные с повышением влагосодержанием приповерхностной части солей, отмечаются в виде локальных зон. Эти области, как и в случае вышележащего горизонта, граничат с участками наибольшего проявления искажений кривых зондирования, связанных с возможным влиянием переходных процессов (рис. 3.7, б, см. вклейку), являющихся одним из диагностических признаков наличия зон повышенной проводимости пород надсолевых и верхней части солевых отложений на этих участках. В плане эти зоны располагаются в пределах западной и восточной окраин территории, а также в виде локальных проявлений, концентрирующихся вдоль линии субмеридионального направления в центральной

ее части, согласуясь с областями резкой латеральной изменчивости свойств среды и искажений наблюдаемого поля, выделенных по данным анализа первичного материала.

В итоге применения компьютерной интерпретации региональной и детализационной съемок ВЭЗ была получена геоэлектрическая модель среды, характеризующая особенности строения и физического состояния пород в интервалах глубин залегания всех основных пачек пород надсолевой части разреза, включая четвертичные отложения, ПЦТ, ТКТ, СМТ+ПП, и верхней части покровных каменных солей. Анализ результатов послойной количественной интерпретации и объемных отображений геоэлектрической модели позволили уточнить ранее известные и получить новые сведения о геологических особенностях исследуемой территории, в частности: 1) выявлена широтная зональность свойств среды, связанная с изменением гидрогеологических условий, литологического состава пород и физического их состояния; 2) выделены три основных участка, требующих повышенного внимания при ведении шахтных работ. Стратиграфически выделенные участки приурочены к отложениям соляно-мергельную толщи и верхней части покровных каменных солей. Аномальность участков проявляется в резком понижении значений электрического сопротивления (до первых единиц омметров) и интенсивным проявлением искажений кривых зондирования, связанных с влиянием переходных процессов. Сквозной характер выделенных аномальных зон, фиксируемых на разных стратиграфических уровнях надсолевой толщи, свидетельствует о гидравлической связи между различными горизонтами, осуществляемой по крутопадающим трещинам и трещинным зонам. Резко пониженные значения сопротивлений указывают на высокую минерализацию подземных вод, связанную с выщелачиванием солей переходной пачки и покровных каменных солей.

3.3.2. Решение экологических задач

Экологические проблемы негативного воздействия на геологическую среду результатов жизнедеятельности человека в последние годы становятся всё более актуальными. Одна из таких проблем связана с хлоридным и углеводородным загрязнением приповерхностной части литосферы и гидросферы, возникающих в результате разработки и освоения нефтяных и газовых месторождений. Техногенные утечки углеводородов представляют не только экологическую опасность, но и часто приводят к безвозвратными потерями ценного углеводородного сырья.

При решении задач поиска и геометризация зон техногенных загрязнений, выявлении их источников все более широкое применение находят электроразведочные методы.

Перспективность их применения определяются, с одной стороны, достаточно высокой контрастностью по электрическому сопротивлению продуктов загрязнения относительно большинства вмещающих пород (достигающей иногда нескольких порядков), проявлением в электрических полях ряда сопутствующих эффектов, связанных с различными физико-химическими и физико-биологическими процессами, с другой — высокой оперативностью и производительностью выполнения работ. Проникая вглубь земных недр, электрические и электромагнитные поля позволяют получать большой объем информации о строении и физическом состоянии слагающих разрез пород. Эффективность их применения в каждом конкретном случае в значительной мере определяется выбором наиболее информативных методик наблюдений и совершенством методов интерпретации наблюденных полей.

Рассмотрим ряд примеров решения различного рода экологических задач методами электроразведки с использованием интерпретационной системы программ ЗОНД.

Выявление и геометризация зон хлоридного загрязнения подземных вод

Данный пример относится к решению задачи выявления и оконтуривания аномальных участков зоны активного водообмена (до глубины порядка 50—60 м), связанных с засолением пресных подземных вод в пределах территории одного из разрабатываемых нефтяных месторождений Пермского края. Исследуемая площадь составляет около 70 км².

Геологический разрез в исследуемом интервале глубин, составленный по данным бурения, включает породы пермского и четвертичного возраста.

Верхняя часть четвертичного комплекса до глубины 10—20 м в пределах пойменной ее части представлена в основном глинами и суглинками с прослоями песчаника, нижняя — до глубины 30—40 м — сложена песками и гравийно-галечниковой смесью. По мере продвижения в южном направлении гравийно-галечниковые отложения выклиниваются из разреза. Нижезалегающие верхнепермские отложения представлены аргиллитом с прослоями песчаников, глин и известняка.

Четвертичные гравийно-галечниковые и верхнепермские аргиллитопесчанниковые отложения водоносны. Флюидоупором служат прослои глин верхнепермских шешминских отложений.

Геоморфологические условия северной — пойменной части территории сравнительно просты: перепад высотных отметок рельефа местности составляет около 20 м при сравнительно монотонном их понижении в северном направлении. Перепад высотных отметок рельефа южной части территории достигает 50 м.

В пределах исследуемой территории имеется большое число трубопроводов и более 800 скважин различного назначения (добывающих, нагнетательных и др.).

Комплекс проведенных исследований включал опытно-методические наблюдения по изучению возможности применения ряда гальванических и индукционных методов электрометрии с целью выбора наиболее оптимального для данных условий метода наблюдений, обеспечивающего необходимую информативность, глубинность и экономическую эффективность работ. Комплекс анализируемых методов включал метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ) и метод, основанный на использовании техногенных электромагнитных полей (МТЭП).

Электрические зондирования выполнялись с помощью стандартной аппаратуры АНЧ-3 с использованием многоканальной питающей линии АВ, смонтированной в виде косы. Максимальный размер питающей линии АВ составлял 200 м, Переключение питающих электродов осуществлялось с помощью специального коммутатора. Для контроля и визуализации измеряемых графиков зондирования была использована специально созданная программа «ВЭЗ-ПОЛЕ», позволяющая с помощью Notebook непосредственно в поле визуализировать измеряемые величины, характер поведения эффективных параметров поля и на количественном уровне оценивать глубинность исследования при заданном диапазоне разносов питающей линии.

Для измерения процесса становления поля применялась портативная аппаратура ТЕМ-FAST48 (разработка ИКИ РАН, г. Москва), оснащенная системой автоградуировки и тестирования [Барсуков и др., 2003]. Работы проводились установкой «петля в петле». Для выбора оптимальных параметров измерительной установки было опробовано несколько вариантов размера одновитковой петли: 50×50 м · м, 25×25 м · м и $12,5 \times 12,5$ м · м с максимальным временем регистрации сигнала 512, 1024 и 2048 мкс.

При выполнении опытных работ методом МТЭП был использован комплекс цифровой аппаратуры СЭР-1 (разработка ВНИМИ,

г. С-Петербург). С помощью данной аппаратуры регистрировались компоненты электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в диапазоне от первых единиц до 80 кГц. В качестве интерпретационных параметров использовались отношения вертикальной и радиальной компонент напряженности магнитного ($H_{\text{отн}} = H_z/H_r$) и электрического ($E_{\text{отн}} = E_z/E_r$) полей, а также значения импеданса $Z = E_x/H_y$, характеризующего эффективное сопротивление среды.

Сравнительный анализ полученных материалов, в целом, показал достаточно хорошую сопоставимость полученных материалов, но несколько различающиеся информационные возможности. Информативность кривых зондирования становлением поля оказалась ограниченной влиянием собственных индуктивных процессов в петле, затрудняющих возможность изучения электрических свойств приповерхностной части разреза до глубин порядка 1/10 стороны измерительной петли и заметным уменьшением соотношения сигнал/помеха при времени регистрации, превышающем 1024 мкс. Практическое применение метода МТЭП показало неустойчивость регистрируемых сигналов и сложности количественной оценки параметров разреза, связанные с недостаточно разработанным на данный момент теоретическим и методическим обеспечением. По результатам опытных работ в качестве базового для проведения площадных экологических наблюдений выбран метод ВЭЗ, который в данных геоэлектрических условиях показал наибольшую информативность при определении электрических сопротивлений пород во всем интервале исследуемых глубин.

Важное значение при проведении экологических исследований с применением электрометрии в условиях урбанизированных территорий является учет влияния на результаты наблюдений различных техногенных объектов — трубопроводов, скважин, имеющих достаточно большую плотность на исследуемой территории. Это обстоятельство учитывалось при планировании схемы расположения профилей и точек зондирования на основе результатов численного моделирования, рассмотренного в разделе 2.4.

Электроразведочные работы выполнялись в два этапа: на первом из них была проведена региональная электроразведочная съемка методом электрического зондирования с глубиной исследования до 40–50 м с целью районирования территории по степени засоленности подземных вод и выделения участков аномально повышенной их минерализации, на

втором — детализационные электроразведочные наблюдения на выявленных в результате региональных работ аномальных участках с глубиной исследования до 100 м.

В результате компьютерной обработки и интерпретации материалов региональных работ была получена геоэлектрическая модель верхней части разреза нефтяного месторождения. Визуальный анализ полученной модели с помощью построения горизонтальных и вертикальных сечений поля кажущихся сопротивлений, геоэлектрических разрезов, карт и объемных отображений поля удельных электрических сопротивлений, отображающих до шести геоэлектрических горизонтов, позволил выделить площадную зональность электрических свойств и проследить общий характер пространственного распространения засоления в интервале глубин от поверхности до 50 м. Выполненный анализ параметрических зондирований, расположенных вблизи скважин, показал достаточно уверенное отображение в геоэлектрическом разрезе основных геологических пород.

На основе корреляционной зависимости между электрическими и воднофизическими свойствами пород были получены карты минерализации по трем основным горизонтам, отождествленным соответственно с «верховодкой» для глубин 0—15 м, четвертичным аллювиальным водоносным горизонтом, приуроченным к гравийно-галечниковым отложениям, находящимся в интервале глубин 15—30 м, и нижележащим верхнепермским (шешминским) водоносным комплексом, залегающим на глубине более 30 м. Одна из таких карт показана на рис. 3.8 (см. вклейку). В результате анализа полученных карт установлено, что минерализация подземных вод приповерхностной части разреза меняется в пределах площади от долей единицы до 10 г/л. При этом область со значениями минерализации, превышающими фоновый уровень (1 г/л), весьма обширна и охватывает около 70 % всей территории. Для водоносного горизонта, залегающего в интервале глубин порядка 15—30 м, область аномально повышенных значений минерализации заметно локализуется. В ее пределах выделено две основные аномальные зоны с минерализацией от трех до десяти и более грамм на литр. Интенсивность аномального поля для нижезалегающих верхнепермских аргиллитопесчанниковых отложений заметно повышается (на отдельных участках до 20 г/л). Наблюдается унаследованность общей конфигурации отмеченных выше аномальных областей, свидетельствующая об единой природе и источниках соляного загрязнения подземных вод.

В результате детализационных электроразведочных работ на выделенных участках был изучен геоэлектрический разрез в интервале глубин от

поверхности до 100–120 м. С помощью анализа объемных отображений поля электрических сопротивлений показано, что механизм хлоридного загрязнения приповерхностной части разреза может быть связан с наличием разуплотненных водопроницаемых зон как в районе затрубного скважинного пространства, так и на отдельных участках геологической среды (трещиноватых зонах), обеспечивающих возможность вертикальной миграции рассолов, находящихся под высоким статическим давлением.

По результатам количественного послойного анализа кривых зондирования установлено, что для обводненных гравийно-галечниковых и аргиллито-песчанниковых пород, залегающих в интервалах глубин соответственно порядка 15–30 м и 30–100 м, аномальность поля повышается, достигая в отдельных случаях значений более 30 г/л. Наиболее высокие значения минерализации приходятся на диапазон глубин залегания аргиллито-песчанниковых отложений, что указывает на наиболее вероятное наличие здесь основных источников хлоридного загрязнения (рис. 3.9, см. вклейку).

Анализ пространственного поведения аномального поля позволил выявить около 30 скважин, являющихся наиболее вероятными источниками хлоридного загрязнения подземных вод.

Выявление приповерхностных техногенных скоплений нефтепродуктов

На предприятиях, связанных с переработкой и хранением нефтепродуктов, нередки случаи их утечки. Как показывает практика, за многие годы работы таких предприятий в приповерхностной части разреза при определенных геологических условиях могут накапливаться достаточно большие объемы углеводородных продуктов. Часть из них, попадая в грунтовые воды, становятся источником загрязнения обширных территорий и водоемов.

Физической предпосылкой возможности картирования углеводородов методом электрического зондирования являются как резкая контрастность электрических свойств искомого объекта относительно вмещающих пород, так и результаты деятельности бактерий, преобразующих нефть, которые трансформируя часть нефтяной пленки в различные кислоты [Bailei et al., 1973; Milner et al., 1977], понижают сопротивление водных растворов. Положительный опыт применения электроразведки для решения подобного рода задач отмечен в работах [Модин и др., 1998; Колесников, Костарев, 2002 и др.].

Рассмотрим пример выявления мест скопления углеводородов на территории одного из нефтеперерабатывающих заводов с использованием метода электрического зондирования.

Геологический разрез приповерхностной части разреза (до глубин 20–25 м), составленный по данным бурения имеющихся на данной территории скважин, представлен породами верхнепермского и четвертичного возраста. Четвертичные отложения, мощностью 0,2–1,2 м, включают почвенно-растительный слой и суглинок. Ниже залегающие породы представлены в основном суглинками с включениями прослоев песка. Суглинок полутвердый, тугопластичный, начиная с глубины порядка четырех-шести метров — водонасыщенный. Мощность его составляет 13–14 м. Далее в разрезе следуют отложения песка, преимущественно мелкого, реже гравелистого, обводненного.

Электроразведочные наблюдения проводились методом вертикального электрического зондирования по системе субпараллельных профилей. Выбор направления профилей и расположения точек зондирования осуществлялся в соответствии с заданной детальностью исследования, с учетом застроенности территории (наличия технических сооружений, заасфальтированных участков и т. п.), с выбором наиболее оптимального расположения измерительной установки относительно источников техногенных помех (см. раздел 2.4). Интервал между точками зондирования составлял 20–24 м. Значения разносов питающей линии измерительной установки менялись в пределах от 5 до 104 м.

С помощью интерпретационной системы ЗОНД был выполнен комплекс работ, включающий первичную обработку полевого материала, качественную и количественную его интерпретацию, графическое представление результатов. Получены геоэлектрические разрезы, карты и объемные отображения поля, характеризующие пространственное изменение электрических свойств среды в интервале глубин от поверхности до 20–25 метров.

Результаты качественной интерпретации и, в частности, объемные отображения поля кажущихся сопротивлений $\rho_k(x, y, z)$, показаны на рис. 3.10 (см. вклейку). На рис. 3.10, *a–в* отчетливо фиксируются характерные проявления углеводородов — аномальное повышение электрических сопротивлений ($\rho_k > 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) приповерхностных отложений, сопровождающееся понижением сопротивлений ($\rho_k < 8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) в нижней (обводненной) части разреза. Наиболее значительные проявления этих аномалий отмечаются в районе первого и второго профилей.

Эти особенности нашли достаточно уверенное отображение и в результатах количественной интерпретации, выполненной в рамках шестислойной модели, наиболее адекватно отображающей основные геологические пакки пород.

Первые три слоя общей мощностью до 6–7 м, отображающие приповерхностную часть разреза, представленную в основном аргиллитами с включениями прослоев песка, показали, что удельное электрическое сопротивление ее колеблется от 6–8 до первых десятков омметров.

Карты удельных сопротивлений приповерхностной, необводненной части разреза, построенные по результатам количественной интерпретации, отметили наличие аномальной области повышенных сопротивлений ($\rho > 16 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) размером примерно $450 \times 350 \text{ м}$, закономерно прослеживаемой в пределах первого-третьего профилей. Наиболее наглядно эта аномальность проявилась в диапазоне залегания второго геоэлектрического горизонта.

Четвертый геоэлектрический слой относительно пониженного электрического сопротивления (от долей единицы до $8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), залегающий на глубине порядка 8–13 м, отождествленный с первым водоносным горизонтом, отметил наличие значительного понижения сопротивления слоя (менее $4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) на участке, что хорошо согласуется в плане с положением зон аномально повышенных сопротивлений второго и третьего слоев, указывая на вероятную их связь с повышенным содержанием нефтепродуктов.

Пятый геоэлектрический слой с параметрами $h_5 = 7–8 \text{ м}$ и $\rho_5 = 10–35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, который по своим электрическим свойствам соответствует сравнительно слабообводненным аргиллитовым отложениям, принят в качестве водоупора для первого водоносного горизонта.

Шестой геоэлектрический слой относительно пониженного сопротивления, залегающий на глубине порядка 20 м, характеризует электрические свойства второго водоносного горизонта, приуроченного к залегающим ниже песчаным отложениям.

Следует отметить, что информативность результатов послойного расчленения разреза различна для разных слоев: более уверенно определяются параметры первого, второго и шестого слоев, менее уверенно (визуально проявляются не на всех кривых зондирования) — третьего-пятого слоев.

Оценка возможных влияний техногенных объектов и латеральной изменчивости свойств среды, выполненные с помощью построения кар-

ты остаточных аномалий, показала, что для основной части территории величина расхождения расчетного и наблюдаемого полей находится в пределах точности полевых измерений (5–7 %). Наибольшие значения расхождения полей (до 15 %) проявились на небольших локальных участках в районе первого (пк. 3, 19) и второго (пк. 11–18) профилей.

По результатам послойного комплексного анализа материалов электрического зондирования, полученных по данному участку, построена прогнозная карта повышенного содержания углеводородов в приповерхностной части разреза (для интервала глубин порядка 4–7 м) (рис. 3.10, з), из которой следует, что интенсивность проявления аномалий, связанных с углеводородами, заметно повышается по мере приближения к первому профилю, указывая на местоположение возможного источника углеводородного загрязнения среды. Наиболее вероятным источником из имеющихся в этой части территории объектов, отмечен район эстакады для заливки нефтепродуктов в железнодорожные цистерны, расположенной в непосредственной близости (примерно в 20 м) от первого профиля. Вскрышные работы, выполненные на отдельных участках территории, подтвердили наличие нефтепродукта в пределах выделенной аномальной зоны.

Другой пример рассматривает случай поиска приповерхностных техногенных скоплений углеводородов на одном из закарстованных участков нефтяного месторождения. Наличие этих скоплений проявлялось в виде периодического (в основном в периоды половодья) выноса нефтяных продуктов водами небольшой подземной реки (шириной до 2–3 м), на участке ее выхода из горного массива.

Задачами проводимых электроразведочных работ являлись: изучение строения и физического состояния пород приповерхностной части геологической среды до уровня грунтовых вод, залегающих на глубине примерно 50 м, с целью выявления зон и возможных путей миграции углеводородных продуктов.

Геологический разрез в интересующем интервале глубин представлен породами нижнепермского и четвертичного возраста. Четвертичные отложения включают почвенно-растительный слой, суглинок, мергелистую глину с прослоями доломита. Общая мощность четвертичных отложений 0,9–1,2 м. Верхняя часть верхнепермских пород представлена обвальными карстовыми отложениями, состоящими из глины мергелистой с дресвой и щебнем, алевролита, доломита, песчаника. Ниже залегает гипс — белый и светло-серый, слабой и средней крепости, трещиноватый, кавернозный. Мощность гипсов составляет примерно 18–22 м.

Далее в разрезе до глубин порядка 50–60 м следуют отложения ангидрита, трещиноватого с прослоями доломита и глинистого материала.

Геоморфологические условия участка достаточно сложны: приповерхностная часть разреза осложнена серией оврагов и содержит большое количество карстовых воронок, отдельные из которых достигают глубины порядка 6 м. Исследуемый участок захватывает часть склона, крутизна которого находится в пределах 35–45°. Перепад высотных отметок рельефа местности в районе оврагов и склона надпойменной террасы достигает 40 м.

Для решения поставленных задач был использован комплекс электроразведочных методов и их модификаций, включающий как традиционные — варианты электрического зондирования, вызванной поляризации в частотной его модификации, так и нетрадиционные, основанные на векторных измерениях поля [Колесников, 2005], и проведении мониторинговых наблюдений с искусственным повышением минерализации водного потока.

Площадные наблюдения методом электрического зондирования проводились четырехэлектродной симметричной измерительной установкой по шести профилям субширотного направления. Расстояние между профилями и точками зондирования по профилям составляло 100 м. Максимальное значение разноса питающей линии равнялось 250 м. Измерение сигнала осуществлялось аппаратурой АНЧ-3.

Учитывая сложные геоморфологические условия, отсутствие выраженной слоистости разреза, затрудняющих строгое использование способов количественного анализа, для истолкования полученных материалов использовались в основном приемы качественной интерпретации. Полученное поле кажущихся сопротивлений (рис. 3.11, б, в, г, см. вклейку), показало достаточно контрастное проявление двух зон. Одна из них — отображаемая относительно пониженными сопротивлениями, носит приповерхностный характер. Контрастность ее выделения быстро затухает с глубиной. Эпицентры области наиболее низких значений сопротивлений в плане совпадают с положением двух скважин, позволяя предположить, что природа этих низкоомных зон связана с изменением свойств пород (повышением трещиноватости, влажности) вблизи скважин, обусловленным технологическими причинами их эксплуатации. Вторая зона, контрастность свойств которой заметно увеличивается с глубиной, имеет отчетливо выраженный глубинный характер. Наиболее высокие значения сопротивлений (2000–3300 Ом·м), соответст-

вующие примерно глубине залегания грунтовых вод, в 2,5–3,5 раза превышающими фоновые его значения поля и в 1,5–2 раза — максимально возможное влияние рельефа местности, указывает на то, что одной из наиболее вероятных причин аномальности поля в данном интервале глубин может служить наличие в составе пород углеводородных флюидов, являющихся изолятором для электрического тока. Достаточно уверенное отображение их в наблюдаемом поле при глубине, в несколько раз превышающей мощность вышележащей толщи, может быть следствием эффекта увеличения размеров аномальной зоны за счет вертикальной миграции газообразных компонент, чему способствует повышенная выветренность и закарстованность слагающих разрез пород. Линейная вытянутость этой зоны и совпадение ее в плане с входом и выходом реки из горного карстового массива позволяют предположить, что углеводороды концентрируются в карстовых образованиях, расположенных вдоль русла подземной реки и выносятся ею в периоды повышения уровня вод.

Конфигурация аномального поля указывает на возможное наличие двух источников углеводородного загрязнения геологической среды. Один из них расположен за пределами северо-восточной окраины исследуемого участка, о чем свидетельствует наличие хорошо выраженной аномальной зоны, закономерно прослеживаемой в пределах четырех профилей юго-восточной окраины участка в виде шлейфа от расположенного примерно в 60 м куста нефтяных скважин. Другой, менее выраженный источник, отмечаемый линейно вытянутой зоной повышенных сопротивлений восточного направления, находится за пределами юго-восточной окраины исследуемого участка в направлении находящегося вблизи нефтепровода.

Выявление приповерхностных скоплений углеводородного газа

В качестве еще одного примера решения экологических задач рассмотрим процесс поиска и геометризации приповерхностных газовых углеводородных скоплений на территории одной из площадок первичной переработки нефти в районе нефтяного месторождения, расположенного на юге Пермского края. Работы были выполнены в связи с аварийной ситуацией, связанной со взрывом газа.

Задачей геофизических исследований являлась оценка мощности четвертичных глинистых отложений и выявление особенностей физико-геологического строения разреза в интервале глубин от поверхности до 20–30 м.

Геологический разрез в исследуемом интервале глубин, составленный по данным бурения имеющихся на участке четырех скважин, представлен породами пермского и четвертичного возраста.

Четвертичные отложения сложены в основном суглинком и глинами. Суглинок серовато-коричневый с включениями щебня до 10 %. Его мощность 0,4–1,0 м. Глина коричневая с включениями галечного материала. Содержание гальки увеличивается с глубиной до 15–20 %. Мощность глин колеблется от 6,4 м до 12,6 м.

Нижезалегающие верхнепермские отложения представлены переслаиванием последовательно залегающих алевролитовой, песчаниковой и аргиллитовой пачек пород. Алевролитовая пачка, имеющая мощность 1,3–4,2 м, представлена коричневым алевролитом, сильноветрелым, сильнотрещиноватым, малой прочности. Песчаниковая пачка сложена мелкозернистым, сильнотрещиноватым песчаником. До глубины 14 м встречаются прослои алевролита. Мощность пачки меняется от 11 м до 17 м. Нижняя часть песчаников водоносна. Абсолютная отметка уровня грунтовых вод около 135 м. Залегающая ниже аргиллитовая пачка включает сильноветрелый аргиллит с небольшими прослоями песчаника и алевролита.

Геоморфологические условия района сравнительно просты: перепад высотных отметок рельефа местности составляет около 19 м при сравнительно монотонном их понижении в северо-восточном направлении.

Электроразведочные наблюдения проводились методом вертикального электрического зондирования по системе профилей субмеридионального направления. Выбор направления профилей и расположения точек зондирования осуществлялся в соответствии с требуемой детальностью и глубиной исследования, с учетом застроенности территории.

Осложняющим фактором проведения электроразведочных работ в данных условиях явилось наличие большого числа технических сооружений (трубопроводов, скважин и др.), способных оказывать влияние на результаты наблюдений. Поэтому при выборе расположения профилей и точек наблюдения, ориентации измерительной установки, привлекались результаты численного моделирования и опыт производства работ в подобных условиях.

Расстояние между профилями в среднем составляло 30–50 м. Точки зондирования по профилю располагались с интервалом 20–25 м при сгущении на отдельных участках до 12 м. Значения разносов питающей линии измерительной установки менялись в пределах от 5 до 200 м.

С помощью компьютерной интерпретации результатов зондирования были получены объемные отображения поля кажущихся сопротивлений, выполнен анализ параметрических зондирований, проведена количественная интерпретация и построены геоэлектрические разрезы, отображающие литологические и физические характеристики пород от поверхности наблюдения до верхнепермских отложений, залегающих на глубине 25–30 м.

Анализ полученных материалов выявил ряд особенностей геологического строения и пространственного изменения электрических свойств пород, показанных на рис. 3.12 (см. вклейку). Установлено, что мощность покровных глинистых отложений в пределах участка закономерно меняется от 6 до 12 м. Карта удельных электрических сопротивлений для интервала глубин залегания нижележащего слоя, представленного алевролитопесчаниковыми необводненными отложениями, являющихся возможным коллектором газа, отметила наличие зон аномально повышенных значений данного параметра, наиболее наглядно проявляющихся на горизонтальных и вертикальных сечениях объемного отображения поля кажущихся сопротивлений (рис. 3.12, а). Наиболее крупная из них оказалась расположенной в пределах юго-восточной окраины объекта, с рядом «заливов» на его территорию, захватывая место аварийного события. Эта область имеет относительно пониженные значения мощности покровных глин.

Для оценки совместного влияния обоих факторов, определяющих опасность данной территории по газовым явлениям — мощности покровных глин и сопротивления залегающих ниже их алевролитопесчаниковых отложений, был использован комплексный параметр, вычисляемый по формуле:

$$G_j = [(\rho_j - 0,9\rho_{\min})(h_{\max} - h_{\min})] / [(\rho_{\max} - \rho_{\min})(h_j - 0,9h_{\min})],$$

где h_j , h_{\min} , h_{\max} — соответственно текущее, минимальное и максимальное значения мощности по данным интерпретации; ρ_j , ρ_{\min} , ρ_{\max} — аналогичные значения сопротивления алевролитопесчаниковой толщи, являющейся наиболее вероятным коллектором газа; $j = 1, L$; L — число зондирований.

Аномальная зона, выделенная по комплексному параметру G_j , так же, как и в случае анализа поля электрических сопротивлений, совпала в плане с участком произошедшего аварийного события (рис. 3.12, б). Выполненное бурение специальных скважин подтвердило факт наличия

повышенного содержания углеводородного газа в пределах выделенной зоны в интервале глубин 10–20 м.

Полученная карта параметра G_p , учитывающая наиболее вероятные диагностические факторы, была использована в качестве прогнозной при выполнении последующих работ по ликвидации аварийной ситуации.

Учитывая сложные техногенные условия производства работ, для оценки возможного влияния техногенных помех на результаты зондирования выполнен расчет поля остаточных аномалий, связанных с отклонениями от квазигоризонтально-слоистой модели среды. Оценка техногенного влияния, выполненная для разных глубин исследования, показала, что интенсивность его увеличивается с глубиной. При этом для большей части территории в интересующем интервале глубин (от поверхности до 15–18 м) она находится в допустимых пределах (рис. 3.12, в), не оказывая существенного влияния на положение выделенной аномалии.

3.3.3. Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания

Методы электрического зондирования и его модификации широко используются при решении различного рода инженерно-геологических задач, включая исследования грунтов под строительство различных зданий и сооружений, оценку технического состояния фундаментов, дамб водохранилищ, резервуаров складирования жидких отходов производства, оценку глубины забивки свай и многое другое. В виде самостоятельной задачи решаются вопросы выявления наличия и глубины залегания подземных вод для проектирования конструкции фундаментов, либо в целях использования водных запасов для нужд производства.

Рассмотрим некоторые из примеров компьютерной интерпретации полевых материалов при выполнении такого вида работ. Начнем с решения ряда задач, возникающих при проведении инженерно-геологических изысканий для проектирования и строительства трубопроводов на примере электроразведочных работ, выполненных в рамках рабочего проекта по строительству нефтепроводной системы Восточная Сибирь — Тихий океан (ВСТО). Исследуемый участок трассы расположен в Усть-Кутском районе Иркутской области.

В задачи электроразведочных работ входило выявление участков развития опасных геологических процессов — карстообразования, оползневых явлений, наличия таликовых зон, тектонических нарушений и др., изучение геоэлектрического разреза в местах переходов трубопро-

вода через водные преграды, исследование грунтов под строительство различных инженерных сооружений (площадок для анодного заземления, радио-релейных станций (РРС) и др.), проведение исследований, связанных с защитой трубопровода от коррозии.

Специфика выполнения работ заключалась в необходимости проведения электроразведочных работ в зимнее время (январь-март), в сжатые сроки и при достаточно сложных геоэлектрических условиях.

Для выполнения работ были опробованы возможности использования гальванических и бесконтактных (профилирование со стелющейся антенной) методов измерений.

Результаты опытных и производственных работ по применению электрического зондирования с использованием гальванических заземлителей и аппаратуры АНЧ-З, ЭРА-В-ЗНАК, генератора КОМБИ, показали, что при типичных для исследуемого района условиях — наличие почвенно-растительного слоя, толщине снежного покрова до 1 м и небольшом числе наледей, данный метод обеспечивает возможность выполнения полевых наблюдений без существенного снижения производительности труда по сравнению с обычными условиями его применения. Поэтому, учитывая достаточно разработанное интерпретационное его обеспечение, данный метод был использован в качестве основного при решении большинства задач.

На отдельных участках с неблагоприятными для гальванических заземлений условиями, наиболее рациональным оказалось использование бесконтактных методов профилирования с аппаратурой ЭРА-В-ЗНАК, позволяющих на качественном уровне получать представление об электрических свойствах пород в пределах эффективной глубины проникновения электрического поля.

При истолковании электрических зондирований использовался полный граф обработки и интерпретации, включающий качественную и количественную интерпретацию, анализ параметрических зондирований (при их наличии). Интерпретация результатов, полученных бесконтактными методами, ввиду отсутствия к настоящему времени достаточно надежного теоретического обеспечения, осуществлялась в основном с помощью программ качественной интерпретации.

Для получения информации о физических характеристиках грунтов и их коррозионной активности в исследуемом интервале глубин (до глубины 5–7 м) наиболее информативным оказалось использование мик-

розондирования геологической среды в точках, расположенных вдоль планируемой трассы трубопровода, с шагом 100 м при максимальном разное питающей линии измерительной четырехэлектродной установки, равном 40 м.

Обработка и интерпретация получаемых материалов, выполняемые в автоматическом режиме с помощью системы программ ЗОНД, позволяли получать разрезы кажущихся сопротивлений и геоэлектрические разрезы, отображающие изменение физического состояния и состава пород вдоль исследуемого участка трассы. Один из фрагментов трассы с результатами интерпретации приведен на рис. 3.13 *а, б* (см. вклейку).

Величина и характер изменений электрических сопротивлений вдоль предполагаемой трассы нефтепровода достаточно контрастно фиксируют основные особенности геологического разреза — участки выхода скальных пород, изменение литологического состава пород, зоны преобладающего содержания аргиллито-алевролитовых и песчаных отложений, участки повышенной льдистости пород и наличия линз льда, образовавшихся в местах разгрузки подземных вод, локальные зоны предполагаемых разрывных нарушений и др. Выходы скальных пород при этом обычно отображаются в виде высокоомных зон ($\rho = 1000\text{--}8000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), закономерно прослеживаемых на отдельных участках трассы во всем интервале исследуемых глубин, либо нижней части разреза, линзы льда и зоны повышенной льдистости пород, также характеризующиеся высокими значениями сопротивлений — имеют приповерхностный характер; участки трассы, с преобладанием в разрезе аргиллито-алевролитовых отложений, отображаются сопротивлениями порядка 100—250 Ом·м. Наличие среди высокоомных скальных пород субвертикальных зон относительно пониженных сопротивлений ($\rho < 100\text{--}150 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), характерных для выветрелых, трещиноватых пород с повышенным содержанием глинистого материала, служит одним из признаков тектонических нарушений на этих участках.

Для оценки коррозионной активности грунтов в заданных интервалах глубин по результатам количественной интерпретации, с помощью соответствующей программы рассчитываются удельные электрические сопротивления для заданной части разреза (в данном случае для интервалов 0—3 м и 3—5 м).

Методика выделения закарстованных участков, согласно проекту выполнения работ, включала выполнение электроразведочных наблюдений методом электрического зондирования по трем-пяти профилям, располагавшимися в основном вдоль трассы. Расстояние между профи-

лями составляло 100 м, шаг наблюдений по профилям — 25–40 м. Максимальный разнос питающей линии *AB* в зависимости от конкретных условий составлял 150–260 м.

Для интерпретации использованы операции контроля и обработки первичного материала, качественной и количественной интерпретации, анализа параметрических зондирований (при наличии данных бурения).

Ввиду дефицита априорных представлений о разрезе, в качестве основного критерия для выделения участков закарстованных пород был использован комплексный подход, учитывающий особенности физико-геологической модели карстовых образований: а) относительное понижение сопротивлений, связанное с повышенным содержанием в них глинистого материала и влагосодержания пород; б) резкую латеральную изменчивость свойств среды, обусловленную наличием локальных карстовых образований (воронок, полостей и т. п.). С учетом этого, для выделения закарстованных участков наряду с традиционными приемами и методами (построением разрезов, карт, объемных отображений кажущихся сопротивлений, геоэлектрических разрезов), характеризующих электрические свойства слагающих разрез пород, были использованы и нетрадиционные интерпретационные параметры — полный нормированный градиент, дифференциальные трансформанты кажущегося сопротивления, поле остаточных аномалий — наиболее чувствительные к наличию локальных образований и зон резкого латерального изменения свойств среды.

На этапе количественной интерпретации, выполняемой путем послойного анализа геоэлектрических разрезов и карт, решались вопросы расчленения разреза по литологическим признакам, определения кровли растворимых пород и базиса коррозии, глубинной привязки выделяемых по данным комплексного анализа аномальных зон предполагаемой повышенной трещноватости, влажности и закарстованности пород. Отдельные фрагменты результатов интерпретации, приведенные на рис. 3.14, *а–г* (см. вклейку) и рис. 2.12, отмечают наличие зоны развития суффозионных процессов и карстообразования в восточной части исследуемого участка, проявляющейся в приповерхностной части разреза (до глубины 2–3 м) и в интервале глубин залегания третьего геоэлектрического горизонта ($z = 15–20$ м). Наиболее отчетливо данная зона отмечается в разрезе полного нормированного градиента (рис. 3.14, *в*), геоэлектрическом разрезе (рис. 3.14, *г*) и поле остаточных аномалий (рис. 3.14, *д*). Контроль отклонения геологического разреза от горизонтально-слоистой модели среды, осуществляемый с помощью поля остаточных аномалий, показы-

вает, что для основной части участка расхождения расчетного и наблюдаемого полей находятся в рамках погрешностей полевых наблюдений (5–7 %). Повышение этой величины (до 10–15 %) пространственно согласуется с зонами предполагаемых карстовых процессов, выделенных на этапе качественной и количественной интерпретации.

Аналогичным образом изучались участки, потенциально опасные по оползневому явлению, где основной упор при анализе наблюдаемых данных делался на выявление особенностей геологического разреза, сопутствующих этим явлениям — степень нарушенности и обводненности пород, вероятный литологический их состав, определяющих жесткость и пластичность отдельных толщ, а также изучение количественных характеристик геоэлектрического разреза (соотношения мощностей и сопротивлений, углов наклона границ), необходимых для оценки устойчивости склона относительно гравитационных смещений пород.

Наблюдения при выявлении оползневых участков выполнялись по створам, проходящим вдоль направления трассы. Количество профилей на каждом из исследованных участков, выбираемое в соответствии с их площадью и проектной детальностью исследования, составляло от трех до пяти. Шаг между точками зондирования по профилям составлял 40–50 м, расстояние между профилями — 100 м. Максимальное значение разноса *AB* равнялось 276 м.

Методика интерпретации включала стандартный набор приемов обработки интерпретации операций — первичная обработка, построение и анализ объемных построений поля кажущихся сопротивлений, выполнение анализа параметрических зондирований и количественная интерпретация электрических зондирований. Основной упор при этом делался на количественную интерпретацию — построение и анализ геоэлектрических разрезов, карт удельных электрических сопротивлений и структурных карт по отдельным горизонтам, содержащих информацию для выполнения геомеханических расчетов оценки устойчивости склона на основе существующих методик.

Аналогичным образом решались задачи изучения геоэлектрической модели среды на участках РРС, анодной защиты, переходов трассы нефтепровода через водные преграды. В качестве примера рассмотрим результаты применения электрического зондирования на одном из проектируемых переходов через р. Лену. Ширина реки на планируемом участке прокладки нефтепровода составляла порядка 200 м, а максимальная глубина порядка 2,5–3 м.

Задачей электроразведочных работ являлось изучение особенностей геоэлектрического разреза до глубины 30–40 м.

Наблюдения были выполнены методом электрического зондирования вдоль заданного створа, пересекающего водную преграду, с шагом между пикетами 50 м с ориентировкой измерительной установки перпендикулярно линии профиля. Максимальный разнос питающей линии (*AB*) составил 200 м.

Для осуществления гальванического контакта приемных электродов с водной поверхностью использовалось бурение льда. Толщина льда менялась в пределах профиля от 0,8 до 1,1 м при толщине снежного покрова до 0,7 м.

В каждой точке зондирования с целью обеспечения повышенной точности и достоверности результатов наблюдений проводились двойные измерения сигнала — при размотке и смотке питающей линии. Оценка расхождения полученных данных показала, что величина погрешности измерений сигнала не превышала 3 %.

В качестве параметрического материала для литологической привязки геоэлектрических границ, выделяемых по данным ВЭЗ, и геологического истолкования получаемых электроразведочных материалов использованы результаты бурения скважины, расположенной вблизи пикета 1. Сопоставление результатов количественной интерпретации параметрического ВЭЗ, с данными бурения (рис. 3.15, *а*, см. вклейку) показало достаточно хорошее отображение в результатах интерпретации практически всех основных пачек пород.

Геоэлектрический разрез, построенный по результатам количественной интерпретации в режиме стабилизации с использованием опорного решения, полученного в результате анализа параметрического зондирования, позволил отобразить особенности строения и характер изменения электрических свойств шести основных пачек пород, залегающих в интервале глубин от поверхности льда до 50–60 м (рис. 3.15, *в*).

Из других примеров применения электрического зондирования при решении инженерно-геологических задач можно привести осуществление контроля состояния резервуаров складирования жидких нефтяных отходов.

Задачей электроразведочных работ являлось изучение геоэлектрического разреза до глубин 10–15 м с целью выявления участков возможной утечки жидких нефтяных отходов из наземных резервуаров их

складирования. На исследуемом участке расположено три таких резервуара для хранения жидких нефтяных отходов (рис. 3.16, см. вклейку).

Складируемые жидкие отходы представляют собой неоднородную массу, состоящую в основном из двух компонентов — слоя высокоминерализованной воды, залегающей в нижней части резервуара и перекрывающей ее толще нефтяных продуктов, имеющих меньший относительно воды удельный вес. В количественном отношении обе компоненты находятся примерно в равной пропорции.

В соответствии с этим, наиболее вероятным продуктом утечки является высокоминерализованный водный раствор, находящийся в нижней части резервуара и обладающий относительно низким электрическим сопротивлением.

Электрические зондирования проводились вдоль контура данного участка с удалением от резервуаров складирования жидких отходов на 10–15 м. Шаг между точками зондирования составлял 10 м. Максимальное значение полуразноса $AB/2$ равнялось 52 м.

В результате качественной и количественной интерпретации полученных материалов выделены три основных зоны аномально пониженных сопротивлений, соответствующих по величине наличию высокоминерализованных вод (с минерализацией более 15 г/л) (рис. 3.16 а, б), природа которых с высокой степенью вероятности связана с утечкой рассолосодержащих жидких нефтеотходов. Первые две зоны, проявляющиеся в виде небольших локальных участков, отмечены в районе северной части первого и второго резервуаров. Они носят приповерхностный характер без признаков проникновения жидких нефтяных отходов на глубину, превышающую 2,0–2,5 м. Третья, наиболее значительная зона, отчетливо проявляется, начиная с глубин порядка 3,0–3,5 м в районе юго-восточной стороны второго резервуара. Заметное понижение сопротивлений и увеличение размеров данной аномальной области с глубиной, указывает на возможное скопление рассолосодержащих жидких отходов на глубинах порядка 20–25 м.

В завершение рассмотрим еще один пример, связанный с проектированием строительства скважинного водозабора для системы поддержания пластового давления на одном из нефтяных месторождений.

Задачей электроразведочных работ являлось изучение строения и электрических свойств пород приповерхностной части геологической среды до глубины порядка 50–60 м с целью выявления наиболее водо-

обильных зон для последующего выбора перспективных участков постановки буровых работ.

Электроразведочные работы выполнялись в два этапа. На первом из них предусматривалось проведение наблюдений по трем региональным профилям с целью выделения наиболее перспективных по водосодержанию участков, на втором — выполнение детализационных работ для локализации аномальных зон и количественной оценки параметров геоэлектрического разреза.

Длина каждого из региональных профилей составляла 1,5 км, шаг между точками зондирования — 200 м (рис. 3.17 а, см. вклейку). Наблюдения проводились методом электрического зондирования при максимальном разnose питающей линии (АВ) 276 м.

С помощью системы программ ЗОНД был выполнен комплекс работ, включающий первичную обработку полевого материала, качественную и количественную интерпретации параметрических зондирований.

Результаты бурения ближайших скважин, расположенных примерно в 3 км от исследуемого участка, показали значительную изменчивость литологического состава и разную литологическую приуроченность водосодержание пород. В результате анализа параметрических зондирований было установлено, что водосодержащие породы отображаются пониженными значениями удельного электрического сопротивления, составляющими для трещиноватых, выветрелых известняков с прослоями мелкозернистого песчаника примерно 120—150 Ом·м, а для трещиноватого и выветрелого мергеля с прослоями известняка — 40—60 Ом·м.

Анализ трехмерного поля кажущихся сопротивлений (рис. 3.17, б, в), показали, что значения кажущегося сопротивления исследуемой территории меняются в достаточно широких пределах, составляющих от 22 до 4250 Ом·м. Область высоких значений кажущихся сопротивлений (470—4250 Ом·м) прослеживается в основном в приповерхностной части разреза (до эффективных глубин порядка 3—7 м) вдоль грунтовых дорог. Природа повышенных сопротивлений связана с наличием слабообводненных пород, которыми в данном случае является насыпной грунт, состоящий в основном из песка. Область пониженных сопротивлений, картирующая обводненную болотистую часть участка, отмечается в пределах северо-восточной его окраины (пр. 3, пк. 1-2, 4-7) до эффективной глубины порядка 3—5 м. По мере увеличения глубины данная зона распадается на два небольших участка, локализующихся, соответ-

ственно, вблизи пикетов 1-2 и 6-7. В интервале эффективных глубин 10–20 м преобладают породы, сравнительно выдержанные по электрическим свойствам. Диапазон изменения сопротивлений для большей части участка составляет 130–470 Ом · м.

Начиная с эффективных глубин 20–26 м в юго-западной части участка в разрезе отчетливо проявилась низкоомная зона, захватывающая отдельные интервалы региональных профилей. В пределах данной зоны выбраны три детализационных участка, охватывающих области наиболее низких сопротивлений. Наблюдения на каждом из детализационных участков были выполнены по трем параллельным профилям, удаленным друг от друга на расстояние 50 м. Точки зондирования по профилям располагались также с интервалом 50 м.

Геоэлектрические разрезы (рис. 3.17 *з, д, е*) и карты удельных электрических сопротивлений по каждому из выделенных горизонтов с учетом результатов анализа параметрических зондирований позволили выделить участки в пределах третьего-пятого геоэлектрических горизонтов, наиболее перспективные для производства буровых работ с целью установки водозаборных скважин. Последующее бурение подтвердило наличие на выделенных участках достаточно высокого водосодержания в предполагаемом интервале глубин.

3.3.4. Применение электроразведки при решении задач отработки соляных месторождений

Электроразведка входит в комплекс методов, используемых при решении различных геологических и горно-технических задач, связанных с обеспечением эффективности и безопасности отработки соляных месторождений. Она применяется как при изучении общих закономерностей изменения электрических свойств солевых и надсолевых отложений, с целью выделения особенностей геологического строения исследуемых участков (тектонических нарушений, зон повышенной трещиноватости, замещения пород), оценки физического состояния водозащитной толщи, картирования водоносных горизонтов и др. (наземные методы), так и в процессе ведения подземных работ (подземные методы) с целью изучения особенностей физического состояния пород в окрестности околоштрекового пространства и выявлении различных негативных факторов, влияющих на безопасность производственного процесса.

Теоретическое и методическое обеспечение наземных электроразведочных методов, имеющих богатый опыт их практического примене-

ния, достаточно разработано и позволяет решать широкий круг задач. Примеры компьютерной технологии интерпретации наземных методов электрического зондирования при выполнении региональных работ были рассмотрены в разделе 3.3.1.

Более сложными являются вопросы, связанные с применением подземных электроразведочных методов непосредственно внутри соляного массива. Специфика подземных условий — измерения поля внутри объема среды, ограниченное свободное пространство для размещения и передвижения измерительных установок, влияние на результаты наблюдений выработанного пространства и других видов помех, вызывает немало трудностей как методического плана, так и истолкования результатов измерений. Вместе с тем, слабая изученность и специфика физических свойств соляных пород нередко приводят к противоречивым толкованиям результатов наблюдений и порождают массу вполне правомерных вопросов относительно информативности и достоверности получаемых материалов, касающихся природы выделяемых аномалий, определения глубинности исследований, роли верхнего и нижнего полупространств (относительно штрека) в формировании электрических полей, влияния на результаты измерений приповерхностных неоднородностей (луж конденсата, штыба, возможного наличия пленки конденсата на поверхности выработки и т. п.).

Ответы на многие из этих вопросов, в силу специфики объекта исследований, весьма затруднительны и часто практически невозможны без уяснения природы и особенностей проводимости солей, без количественных оценок электрических свойств слагающих разрез пород и изучения особенностей распространения электрического тока, без накопления определенного параметрического материала, необходимого для повышения однозначности истолкования получаемых результатов.

Современная методико-интерпретационная база производства подземных исследований включает как использование традиционных методов (электрического профилирования, зондирования), адаптированных к подземным условиям [Хмелевской, 1964, 1984 и др.], так и поиски и разработку специальных для данных условий методов — межштрекового и наземно-подземного просвечивания, томографических и векторных методик измерений и др. [Иванова и др. 1996; Игнатова и др., 1996; Колесников, 2004].

Рассмотрение результатов исследований в рамках всех этих направлений выходит за рамки данной работы. Остановимся лишь на некото-

рых общих вопросах, связанных с обоснованием природы электропроводности соляных пород и параметрического обеспечения подобных работ, в частности, определения количественных значений электрических характеристик соляных отложений (удельных электрических сопротивлений, коэффициентов анизотропии), необходимых для истолкования результатов наблюдений. Получение такой информации наземными методами электроразведочных наблюдений на постоянном токе практически невозможно ввиду большой глубины залегания соляных пород и проявления их экранирующих свойств.

Остановимся на физико-геологических особенностях электрической проводимости соляных пород, определяющих возможности применения тех или иных методов электроразведки при их изучении.

Соль — уникальный и в геологическом, и электрическом отношении объект исследования. В чистом виде она является диэлектриком — изолятором для квазипостоянного электрического тока, но в то же время обеспечивает хорошую проникающую способность для высокочастотных электромагнитных волн. С другой стороны, например, при высоком содержании в ней поровой влаги, она ведет себя как хороший проводник и дает обратную картину для возможности распространения в ней постоянных и переменных полей.

В условиях естественного залегания соляных пород их электрические свойства определяются достаточно большим числом факторов: степенью трещиноватости, флюидонасыщенности, содержания влаги, ее минерализации, характером напряжения, составом пород, наличием примесей, структурой и текстурой пород, обуславливающих не только широкий диапазон возможных значений проводимости, но и анизотропные и фрактальные ее свойства. Электрическими проводниками в солях служат низкоомные прослои и тонкие пачки соленосных глин, межзерновые границы, макро- и микротрещины, образовавшиеся в результате тектонических подвижек, гидроразрыва, выщелачивания пород, образования полостей отслоения, по которым происходит конвективный массоперенос вещества [Кудряшов, 2001 и др.]. При этом, как известно [Кобранова, 1962], незначительные (1–10 %) изменения влагосодержания, пористости и трещиноватости пород сопровождаются существенными (до нескольких порядков) изменениями их электрического сопротивления.

Следует добавить, что в формировании электропроводности солевых пород определенную роль играют и процессы ионизации вещества, обусловленной наличием эманаций радия (^{222}Rn — радон, ^{220}Rn — то-

рон), проникающих с больших глубин по системе капилляров (так называемое «дыхание Земли»). Содержание их в подземных условиях примерно на три порядка выше, чем в слое атмосферы, вследствие чего проводимость почвенного воздуха более чем в 30 раз превышает проводимость атмосферного воздуха [Богословский и др., 2001]. Еще более высокий радиационный фон в данных условиях обеспечивает ^{40}K , имеющий повышенную концентрацию в соляной толще.

Все это предопределяет электрическую проводимость солевых отложений, наличие их микроанизотропных свойств и является физико-геологической предпосылкой применимости электрометрии при изучении строения и физическом состоянии соляных пород. Высокая чувствительность электропроводности солей к их влагосодержанию, повышению минерализации подземных вод определяет высокую информативность методов электроразведки при решении задач, связанных с выявлением участков повышенной обводненности пород, картированием рассольного горизонта, определением путей миграции вод и т. п.

Рассмотрим ряд количественных оценок электрических и анизотропных свойств соляных пород, являющихся необходимым параметрическим обеспечением методов шахтной электрометрии. Воспользуемся для этого результатами интерпретации параметрического подземного электрического зондирования, выполненного в одном из панельных конвейерных штреков, проходящем вблизи солеразведочной скважины. Длина штрека составляла более двух километров. Электрическое зондирование проводилось симметричной четырехэлектродной установкой при максимальном разnose питающей линии установки 1500 м. Для повышения надежности было проведено двойное зондирование (на размотке и смотке питающей линии). Расхождения измеренных значений при этом не превысили фоновый уровень погрешностей измерений (5 %). Полученная кривая зондирования (рис. 3.18, см. вклейку) имеет типичный для интегральных методов плавный характер поведения.

Количественная интерпретация, выполненная с помощью программы Зонд, позволила выделить семислойный разрез. Хорошее совпадение наблюденной кривой зондирования с расчетной указывает на ее соответствие горизонтально-слоистой модели среды. Небольшие расхождения сравниваемых кривых, отмечаемые на первых двух разносах, связаны с влиянием на результаты измерений выработанного пространства штрека.

Сравнительный анализ результатов интерпретации и геологической колонки показывает, что выделенные геоэлектрические горизонты и по

мощности, и по сопротивлению (в рамках эквивалентности) достаточно уверенно отождествляются с геологическими пачками пород верхнего относительно штрека полупространства.

Объяснением этого в данном случае могут служить два благоприятных фактора: а) выраженная однородность литологического состава пород нижнего полупространства, представленного в основном толщей подстилающей каменной соли (ПдКС) мощностью более 200 м, и б) относительно высокое сопротивление подстилающей каменной соли, по сравнению с продольным сопротивлением пород перекрывающего ее верхнего полупространства.

Эти факторы позволяют сделать предположение о том, что геологическая среда при расположении измерительной установки вблизи кровли ПдКС, в электрическом отношении может рассматриваться в виде модели слоистого полупространства с поверхностью раздела, соответствующей кровле ПдКС (по аналогии с границей раздела земля-воздух при наземных наблюдениях), что обеспечивает возможность зондирования в верхнее полупространство.

Количественная оценка коэффициента эмиссии по результатам количественной интерпретации параметрического зондирования (при данном предположении), выполненная по формуле $k = (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) / (\rho_{\text{н}} + \rho_{\text{в}})$, где $\rho_{\text{н}}$ — удельное электрическое сопротивление подстилающей каменной соли, а $\rho_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n h_i / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}$ — среднее продольное сопротивление перекрывающей ее тощи пород, показывает, что коэффициент пропускания тока в верхнее полупространство более чем в девять раз превышает его значение для нижнего полупространства. При расчетах коэффициента пропускания, ввиду отсутствия в данных интерпретации сопротивления подстилающих солей, в качестве его бралось значение сопротивлений пятого геоэлектрического горизонта, отождествленного с пачкой пород, представленной каменной солью с прослоями мергеля. Эта неоднородность состава, понижающая истинное сопротивление каменной соли, говорит о еще большей контрастности сопротивлений сравниваемых частей разреза.

Данные оценочные расчеты показывают, что рассматриваемый геологический разрез с достаточно высоким приближением может быть аппроксимирован моделью слоистого полупространства с границей раздела, совпадающей с кровлей подстилающих солей. Это обстоятельство во

многим объясняет результаты достаточно хорошего соответствия характера поведения и результатов количественной интерпретации параметрической кривой с геологическим разрезом пород продуктивной и надсолевой части разреза, а также указывает на предпочтительность применения в данной ситуации гальванических методов по сравнению с индуктивными, для которых высокоомные отложения ПДКс не являются экраном и наблюдаемое поле формируется в результате распространения его как в верхнее, так и в нижнее полупространство.

Полученные результаты количественной интерпретации параметрического зондирования показывают существенную дифференциацию по электрическому сопротивлению основных пачек, слагающих соляную толщу пород. Диапазон изменения сопротивлений составил от 1 700 до 38 000 Ом · м. Как и следовало ожидать, наиболее высокими сопротивлениями ($\rho = 38000$ Ом · м) обладают породы с преобладающим содержанием каменной соли (как наиболее плотные), наименьшими ($\rho = 1700$ Ом · м) — карналлитовые породы, имеющие относительно пониженную плотность. Удельное электрическое сопротивление сильвинитовой пачки ($\rho = 16\,000$ Ом · м) занимает промежуточное положение относительно отмеченных выше пород. Низкие значения сопротивления ($\rho = 420$ Ом · м) сильвинитовой пачки, примыкающей к поверхности штрека до глубины порядка 0,8 м, объясняются повышенным содержанием поровой влаги, являющейся результатом образования конденсата на стенках штрека.

В общем случае при проведении шахтных электроразведочных наблюдений на горизонтах продуктивной толщи, более удаленных от кровли подстилающих солей, результаты зондирования носят интегральный характер, учитывающий общий характер изменения электрических свойств пород окружающего штрек пространства без определения пространственного положения аномальной зоны относительно штрека.

В качестве экспресс-метода при изучении околоштрекового пространства при ограниченной длине выработки L (обычно $L = 600$ м) может быть использовано трехразное зондирование с установкой МНА—АМН, обеспечивающей максимально возможную при данных размерах штрека глубинность зондирования вдоль всей его длины (см. разделы 1.3, 1.7), составляющей примерно $Z_{эфф} \cong L/(4 \cdot \lambda)$. Технология съемки включает двухэтапный процесс: на первом этапе выполняется съемка первой половины штрека (прямой ход), затем происходит взаи-

мозамена положения приемной линии и питающего электрода A и обрабатывается вторая половина штрека (обратный ход). Один из примеров использования данного метода приведен на рис. 2.10, б.

Для выполнения количественного послойного определения сопротивления пород верхней и нижней частей разреза необходима информация о параметрах слоев одного из полупространств. Эта информация в данных условиях может быть получена, например, на основе выполнения двухуровневых зондирований, с одним из уровней, расположенным вблизи кровли ПдКС. Математическим обеспечением такой задачи является расчет поля во внутренних точках горизонтально-слоистой модели среды. Решения ее для некоторых частных случаев рассмотрены в работах [Хмелевской и др., 1994; Sato, 2000 и др.].

Анализ рассмотренной выше параметрической кривой зондирования позволяет определить и еще один важный параметр — коэффициент анизотропии слоистых соляных толщ.

Соляная толща ВКМКС характеризуется наличием достаточно хорошо выраженной тонкослоистости, являющейся следствием «микроритмических» процессов осадконакопления и седиментации пород [Кудряшов, 2001]. Визуально контролируемые мощности прослоев составляют до нескольких долей миллиметра. Чередование высокоомных прослоев (галит, сильвинит, карналлит и др.) с низкоомными (соленосные влагосодержащие глинистые породы), отличающихся по электропроводности в десятки и сотни раз, обуславливает ярко выраженную анизотропию электропроводности, проявляющуюся в резком различии свойств среды вдоль и поперек напластований.

Изучение и учет анизотропии при интерпретации в этих условиях является весьма важным для интерпретации данных электротриеметрии и, в частности, для определения глубинности исследования.

Вместе с тем сведения об анизотропии, физическая природа которой связана с целым рядом факторов: тонкой слоистостью, трещиноватостью, зернистостью, напряженно-деформированным состоянием пород, могут служить источником дополнительной информации о литологических, структурных, текстурных и тектонических особенностях строения соляного массива. Отсутствие перекрывающих наносов, отчетливое прослеживание на стенках штрека простирания анизотропных пород создают благоприятные условия для ее изучения.

Для оценки коэффициента анизотропии, связанного с микрослоистостью соляных напластований, воспользуемся соотношением между обоб-

ценными параметрами слоистой толщи, получаемыми по данным зондирования, и истинными параметрами среды (см. раздел 1.7). В соответствии с этим соотношением среднее значение коэффициента анизотропии для каждого i -го геоэлектрического слоя можно определить по формуле $\lambda_i = h_i^{\text{ВЭЗ}} / h_i^{\text{СКВ}}$, где $h_i^{\text{ВЭЗ}}$ — среднее из эквивалентных значений данного параметра, $h_i^{\text{СКВ}}$ — мощность соответствующей пачки соляных пород. Выполненные расчеты показали, что для сильвинита и каменной соли среднее значение коэффициента анизотропии составляет примерно 1,4, для карналлита — 1,3, для толщи соляно-мергельных отложений — 1,1.

Для оценки анизотропии в условиях изучения околоштрекового пространства могут быть использованы разные методики, например, методика измерений с трехэлектродной линейной установкой и методика измерений с дипольной экваториальной (нелинейной) установкой. Первая из них наиболее приемлема при изучении анизотропии, связанной с наличием тонкослоистых напластований отдельных пачек солевых пород. Применение ее основано на том, что величина отношения измеренной разности потенциала вдоль и поперек напластования $\Delta U^{\parallel} / \Delta U^{\perp}$ (либо $\rho_k^{\parallel} / \rho_k^{\perp}$), согласно «парадоксу анизотропии» (см. раздел 1.5), соответствует истинному значению коэффициента анизотропии λ . Вторая методика, обладающая более высокой чувствительностью к анизотропии (достигающей в пределе λ^5) [Хмелевской и др., 1994; Шевнин, 1995], наиболее эффективна при изучении геологических факторов, обуславливающих сравнительно небольшие значения коэффициента анизотропии (изучении степени и простиранья трещиноватости пород, уточнении зон малоамплитудных тектонических нарушений, выделении зон напряженного состояния и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

Абрамова Е. Ш. Способ оперативного и точного вычисления интегралов, применяемый к расчету ряда геофизических кривых. М.: 1985. 12 с. (Препринт ВСЕГИНГЕО).

Абрамова Е. Ш. Способы решения обратной задачи ВЭЗ // Известия АН СССР Сер. Физика Земли. 1979. 11. С. 89–96.

Аронов В. И. Методы математической обработки геологических данных на ЭВМ. М.: Недра, 1977.

Аронов В. И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. М.: Недра, 1990. 300 с.

Альпин Л. И. Влияние расстояния между измерительными электродами на результаты электрического зондирования // Прикладная геофизика, М.: Гостоптехиздат. 1945, вып. 1.

Альпин Л. М., Даев Д. С., Каринский А. Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. М.: Недра, 1985. 407 с.

Барсуков П. О., Файнберг Э. Б., Хабенский Е. О. Применение метода переходных процессов (технология TEM-FAST) для решения задач малоглубинной геоэлектрики и исследований окружающей среды // Труды I Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. М.: ОИФЗ РАН. 2003. С. 142–152.

Березкин В. М. Метод полного градиента при геофизической разведке. М.: Недра, 1998. 188 с.

Бобачев А. А., Марченко М. Н., Модин И. Н., Урусова А. В., Шевнин В. А., Перваго Е. В. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. М.: 12. С. 79–90.

Бобачев А. А., Модин И. Н., Перваго Е. В., Шевнин В. А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред // Разведочная геофизика. М.: 1996. Вып. 2. 50 с.

Бобачев А. А., Горбунов А. А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр. 2005. № 12.

Боголюбов А. Н., Боголюбова Н. П., Мозганова Е. Я. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. М.: Стройиздат. 1984. 200 с.

Боголюбова Н. П., Боголюбов А. Н. Причины образования «ворот» на кривых ВЭЗ и их геологическая информативность // Изучение свойств массивов горных пород и геологических процессов. М.: 1986. С. 44–49.

Богословский В. А., Жигалин А. Д., Хмелевской В. К. Экологическая геофизика: Учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2000. 256 с.

Бурсиан В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра, 1972. 168 с.

Валюс В. П., Рудерман Е. Н. Два алгоритма минимизации функции $R_1(t)$ параметров n -слойного разреза при решении обратной задачи электроразведки методом сопротивлений // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1972. Вып. 66.

Ваньян Л. Л., Морозова Г. М., Ложенцица Л. В. О расчете теоретических кривых электрического зондирования // Прикладная геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1962. Вып. 34.

Варламов Н. М., Лобанов Е. М. Интерпретация электрических зондирований на постоянном токе по точкам перегиба // Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. 1981. № 144. С. 66–79.

Варенцов И. М. Современные тенденции в решении прямых и обратных задач трехмерной геоэлектрики // Математическое моделирование электромагнитных полей. М.: 1983. С. 26–68.

Ведринцев Г. А. Электрические зондирования // Электроразведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1980. С. 75–77.

Гласко В. Б., Кулик И. И., Тихонов А. Н. Об определении геоэлектрического разреза на основе метода регуляризации // Вычислительная математика и математическая физика. 1972. Т. 12.

Глушко С. П., Попов Е. А., Селянов В. И. О решении обратной задачи электроразведки методом регуляризации // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 3. С. 86–89.

Гольцман Ф. М. Статистические модели интерпретации. М.: Наука, 1971. 324 с.

Гольцман Ф. М. Статистическая интерпретация геофизических данных. Л.: издательство ЛГУ, 1981. 255 с.

Гудзь В. И. О машинной интерпретации кривых ВЭЗ // Разведка и охрана недр. 1972. № 2.

Гудзь В. И., Ряполова В. А. Новый способ машинной интерпретации кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) // Сборник научных трудов. М.: издательство ВНИИТранспортного строительства, 1976. Вып. 88. С. 16–30.

Гудзь В. И. Теория решения обратных задач электроразведки // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1980. № 7. 84–92.

Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982. 340 с.

Дианова В. И. Комплекс программ автоматической обработки кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) // Сб. Геолого-геофизические аспекты изучения и оценки оловорудных районов Востока СССР. М.: 1984. С. 132–145.

Дмитриев В. И., Захаров Е. В. Методы расчета поля постоянного тока в неоднородных проводящих средах // Вычислительные методы и программирование. М.: МГУ, 1973. Вып. XX. С. 175–186.

Дмитриев В. И., Несмеянова Н. И. Метод численного исследования квазистационарного поля над слоистой средой с осесимметричным поднятием // Вычислительная математика и математическое обеспечение ЭВМ. М.: МГУ, 1985. С. 176–181.

Дмитриев В. И. Обратные задачи электромагнитных методов геофизики. Некорректные задачи естествознания. М.: 1987. С. 54–76.

Дмитриев В. И. Обратные задачи электромагнитного зондирования // Условно-корректные задачи математической физики и анализа. Новосибирск: Институт математики СО РАН. 1992. 85–97.

Дмитриев В. И. и др. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. М.: Недра, 1990. 498 с.

Друскин В. Л. О единственности решения обратной задачи электроразведки и электрокаротажа для кусочно-постоянных проводимостей // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982, № 1. С. 72–75.

Жданов М. С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 314 с.

Жданов М. С., Варенцов И. М., Голубев Н. Г., Крылов В. А. Методы моделирования электромагнитных полей. М.: Наука, 1990. 200 с.

Жданов М. С., Спичак В. В. Современные методы моделирования квазистационарных электромагнитных полей в трехмерно-неоднородных средах. М.: 1984. С. 31. (Препринт / ИЗМИРАН, № 45 (519)).

Жданов М. С., Спичак В. В. Математическое моделирование трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в геоэлектрике // ДАН СССР. 1989. Т. 309, № 1. С. 57–60.

Заборовский А. И. Задача о сфере в теории электроразведки // Сб. Бюллетень нефтяной геофизики. М.: ОНТИ НКТП СССР. 1936, вып. 11.

Заборовский А. И. Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 424 с.

Зарипова Н. Г., Киричек М. А., Кольнер И. Г. и др. Способ нормированных производных для интерпретации материалов электроразведки в Западном Узбекистане // Экспресс-информация. Сер. Регион., развед. и промысл. Геофизика, № 79. М.: Всесоюзный институт экономии минерального сырья и геологоразведочных работ. 1971.

Захаров Е. В., Ильин И. В. Интегральные представления в неоднородной слоистой среде // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1970. № 8. С. 62–71.

Зиненберг В. И. Решение прямой и обратной задачи метода вертикального электрического зондирования. Диссертация канд. физ.-мат. наук. Новосибирск. 1973.

Зиненберг В. И., Киришин А. В. Площадная интерпретация геофизических данных с помощью ЭВМ // Геофизические исследования на нефть и газ в Узбекистане. Ташкент. 1974. С. 28–32.

Иванова С. В., Модин И. Н., Перваго Е. В. Выявление структуры нарушения угольного пласта с помощью электрического просвечивания на постоянном токе // Эффективная и безопасная подземная добыча угля на базе современных достижений геомеханики. С.-Петербург, 1996. С. 111–115.

Игнатова И. Д., Модин И. Н., Шевнин В. А. Векторные измерения в методе сопротивлений. М.: Вестник МГУ, серия «Геология», 1996. № 1.

Изотова Е. Б., Хорев О. А. Алгоритмы и программы интерпретации многослойных кривых ВЭЗ. Л.: Всесоюзный институт разведочной геофизики, 1968.

Изотова Е. Б., Никитина Л. А., Ермохин К. М. Способ интерпретации площадных съёмки стационарных электрических полей // Мето-

ды разведочной геофизики. Теория и практика интерпретации в рудной геофизике. Л.: 1984. С. 9–18.

Изотова Е. Б., Ермохин К. М., Петров А. А., Федоров А. Н. Интерпретация зондирований в неоднородных средах. Л.: ЛГУ. 1987. Т. 113. С. 73–79.

Израильский Ю. Г., Окунцев С. Ю., Гальберт В. А., Машунин Ю. К., Шкабарня Н. Г. О машинной интерпретации кривых электрического зондирования в случае горизонтально-слоистых сред // Обработка информации в геофизических исследованиях. Владивосток. 1986.

Израильский Ю. Г., Шкабарня Н. Г. Алгоритм расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для среды с неоднородностью в виде сферы // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1984, вып. 110. 89–90.

Илюшин С. А., Петров А. А. Количественная интерпретация данных электроразведки методами постоянного тока и вызванной поляризации // Поиски и прогноз, оценка рудных месторождений методами электроразведки. Л.: НПО «Рудгеофизика». 1990. С. 13–28.

Каленов Е. И. Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования. М.: Гостоптехиздат, 1957. 472 с.

Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М.: Гостоптехиздат, 1962. 490 с.

Карпов Л. Д. Возможности трассирования разрывных нарушений по данным ВЭЗ в условиях Северного Сахалина // Разведочная геофизика М.: Недра, 1970. Вып. 41.

Киришин А. В., Зиненберг В. И., Синельников В. Я. и др. Расчет кривых электрического зондирования при конечных размерах приемной линии // «Экспресс-информация. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика». М.: Всесоюзный институт экономии минерального сырья и геологоразведочных работ, 1972.

Колесников В. П. Обработка и интерпретация результатов вертикального электрического зондирования с помощью ЭВМ. М.: Недра, 1981. 140 с.

Колесников В. П. Использование статистического моделирования при интерпретации данных ВЭЗ // Деп. в ВИНТИ. 1986. № 121-В. 15 с.

Колесников В. П., Кутин В. А. Использование приемов оптимального сглаживания экспериментальных данных при автоматической интерпретации ВЭЗ // Деп. в ВИНТИ. 1987. № 4665-В. 13 с.

Колесников В. П. Интерпретация электрических зондирований методом особых точек // Деп. в ВИНТИ. 1990. № 4959-В. 19 с.

Колесников В. П., Кутин В. А., Геник И. В. Математическое моделирование электрических полей при решении задач наземной и подземной электротомии // Геофизика и математика. Вторая Всероссийская конференция. Пермь: 2001. С. 149–158.

Колесников В. П., Костарев С. В. Применение методов электротомии для решения проблем нефтепромысловой геоэкологии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М.: ВНИИОЭНГ. 2002. № 8. 131–138.

Колесников В. П. О повышении эффективности компьютерной интерпретации электрических зондирований // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Екатеринбург: 2002. С. 280–284.

Колесников В. П. Состояние и перспективы развития методов электротомии при решении задач, связанных с разработкой Верхнекамского месторождения солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Пермь: Горный институт УрО РАН. 2004. С. 149–154.

Колесников В. П. Способ геоэлектроразведки // Патент на изобретение № 2256198 (РФ). 2005.

Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра, 1980. 391 с.

Кошлаков Г. В. О выделении скрытых тектонических нарушений по данным методов ВЭЗ и ТТ в Южном Таджикистане // Разведочная геофизика. М.: Недра, 1967. Вып. 18.

Кризский В. Н., Заваруева М. Б. Решение задач геоэлектрики постоянного тока трехмерных сред кусочно-постоянной проводимости // Актуальные вопросы мех. электрон. физ. Земли и нейтрон. методов исследования. Стерлитамак. 1997. Т. 3. 112–116.

Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. Пермь.: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.

Курдюков Е. П., Соболев С. В. Обратная задача электрического зондирования методом сопротивлений // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1992. № 11.

Курдюков Е. П., Соболев С. В. Обратная задача метода сопротивлений для некоторых слабоградиентных сред // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1992. № 3. С. 119–123.

Кусков В. В. К вопросу об искажениях кривых ВЭЗ в условиях негоризонтальных границ раздела // Вестник Московского университета, сер. Геологическая. М.: МГУ. 1979. № 5. С. 68–72.

Кусков В. В. Численное моделирование вертикальных электрических зондирований в двумерно-неоднородных средах // Вестник Московского университета, сер. Геологическая. М.: МГУ. 1985. 51–55.

Кутин В. А., Колесников В. П. Приемы визуализации трехмерных геоэлектрических полей // Теория и практика интерпретации данных электромагнитных геофизических полей. Екатеринбург. 1996. С. 77–79.

Кутин В. А., Колесников В. П. Численное моделирование электрических полей для трехмерных моделей сред // Проблемы горного недроведения и системологии. Пермь: Горный институт УрО РАН. 1999. С. 36–38.

Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. М.: Недра, 1984. 270 с.

Лам Куанг Тхиен, Ле Вует Зы Хьонг. Эффективность алгоритма снятия слоев со стабилизацией решения при интерпретации кривых ВЭЗ // Прикладная геофизика. М.: 1984. № 110. С. 98–102.

Мартышко П. С. О двухэтапных методах интерпретации данных электроразведки на постоянном токе // Известия РАН. Сер. Физика Земли. 1994. № 9. С. 91–93.

Матвеев Б. К. Машинная интерпретация электромагнитных зондирований // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1970. Вып. 58.

Матвеев Б. К. Интерпретация электрических зондирований. М.: Недра, 1974. 232 с.

Матвеев Б. К. Электроразведка. М.: Недра, 1990. 368 с.

Мелькановицкий И. М., Ряполова В. А., Хордикайнен М. А. Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод. М.: Недра, 1982. 239 с.

Модин И. Н., Шевнин В. А. Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения // Прикладная геофизика, 1984. Вып. 109. С. 75–82.

Модин И. Н., Шевнин В. А., Дроздова О. Л. Анализ геологических возможностей ВЭЗ с использованием кривых Дар-Заррук // Вестник Московского университета, сер. Геология. М.: МГУ. 1986. № 3. С. 88–95.

Модин И. Н., Яковлев А. Г., Одинцов К. Л. и др. Методика и программное обеспечение интерпретации данных метода сопротивлений // Геофизические исследования в гидрогеологии, инж., геологии. Ташкент: САИГИМС. 1991. Ч. II. С. 74–81.

Модин И. Н., Смирнова Т. Ю., Яковлев А. Г., Перваго Е. В. Расчет кажущегося сопротивления над сложными геоэлектрическими разрезами методом интегральных уравнений // Вестник Московского университета. Геология. М.: МГУ. 1992. № 3. С. 91–95.

Модин И. Н., Шевнин В. А., Бобачев А. А., Большаков Д. К., Владов М. Л., Старовойтов А. В. Изучение методами электроразведки локальных загрязнений геологической среды нефтепродуктами // Горная геофизика. 1998. 301–311.

Модин И. Н., Большаков Д. К., Бобачев А. А. и др. Вклад сотрудников кафедры геофизики в развитие малоглубинной электроразведки // Ломоносовская школа МГУ по геофизическим методам исследования земных недр. М.: МГУ. 2004. С. 72–177.

Мыщик Н. В. Алгоритм интерпретации кривых вертикальных электрических зондирований // Геол. и геогр. Минск. 1984. № 6. С. 30–39.

Никольский В. В. Теория электромагнитного поля. «Высшая школа», 1961.

Опарин В. Н. К решению обратной задачи вертикального электрического зондирования // Геология и геофизика. Новосибирск: Наука, 1975. № 6. С. 140–144.

Петров А. А., Федоров А. Н. Решение обратной задачи электроразведки методами постоянного тока и вызванной поляризации // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1988. № 11. С. 60–65.

Петров А. А., Федоров А. Н. Интерпретация данных электроразведки постоянным током в условиях неровного рельефа // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 12.

Петрухин Б. П. Статистическое повышение точности результатов ВЭЗ // Деп. в ВИНТИ, № 7596-В. 1986.

Петрухин Б. П. Использование ЭВМ для оценки эффективности ВЭЗ // Разведочная геофизика. 1991. № 113. С. 136–142.

Порохова Л. Н., Шевнин В. А., Бахиров А. Г. Интерпретация кривых ВЭЗ на ЭВМ с оценкой эффективности решения // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1987. № 8. С. 74–80.

Пятин Н. М. Способ решения неустойчивых задач (на примере ОЗ ВЭЗ) // Вестник Воронежского университета. Геология. Воронеж. 2003. № 1. С. 170–174.

Пылаев А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М.: Недра, 1968. 148 с.

Редозубов А. А. К вопросу применения электроразведки в анизотропных породах // Вопросы рудной геофизики. Свердловск, 1973. Вып. 105. С. 18–33.

Ремпель Г. Г., Филатов В. А. и др. Интерпретация данных ВЭЗ методом подбора с применением ЭВМ // Труды Сибирского НИИ геологии, геофизики и минерального сырья. 1975. Вып. 215.

Рыжов А. А., Каринская И. Д. Программы решения прямой и обратной задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для ЭВМ серии ЕС. М.: ВСЕГИНГЕО, 1981. 134 с.

Рыжов А. А. Оптимальный алгоритм решения прямой задачи ВЭЗ // Доклады АН СССР. Физика Земли, № 3, 1983. С. 69–74.

Ряполова В. А., Богомазова Т. А. Особенности машинной интерпретации кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с полной автоматизацией всего процесса // Совершенствование средств и методов изысканий ж. д. М.: 1986. С. 85–89.

Сахарников Н. А. Поле точечного источника в среде, состоящей из клиновидных однородных частей // Ученые записки ЛГУ. Л.: 1966. ЛГУ. № 329. вып. 16. С. 35–40.

Светов Б. С. Теоретико-информационные основы геофизических методов разведки. М.: МГП Геоинформмарк, 1992. 72 с.

Светов Б. С., Бердичевский М. Н. Электроразведка на современном этапе // Геофизика. М.: ОИФЗ РАН. 1998. № 2. С. 4–11.

Семенов А. С. Анизотропия горных пород и особенности электрических полей в анизотропных средах // Вестник ЛГУ, 1975. № 24. С. 40–47.

Серебренникова Н. Н. Численное моделирование постоянного электрического поля точечного источника в неоднородных слоистых трехмерных средах // Деп. в ВИНТИ, № 6762-В-87. 1987. 17 с.

Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 3, Электричество. М.: Наука, 1977. 688 с.

Скальская И. П. Поле точечного источника, расположенного на поверхности земли над наклонным контактом // ЖТФ. 1948. вып. 10. т. 18. С. 22–34

Смирнов А. А., Закутский С. Н., Притыка И. В. Руководство по обработке и интерпретации результатов наземной электроразведки. Воронеж: изд-во ВГУ, 1985. 232 с.

Соловейчик Ю. Г., Токарева М. Г., Персова М. Г. Решение трехмерных стационарных задач электроразведки на нерегулярных параллелепипедальных сетках // Вестник ИрГТУ. 2004. № 1. С. 22–33.

Спичак В. В. Визуализация трехмерных объектов в геоэлектрике по электромагнитным данным // 5 Всесоюзный семинар по вычислительной томографии. Звенигород: 1991. С. 86.

Страхов В. Н. Об аналитическом определении параметров горизонтально-слоистой среды по данным вертикальных электрических зондирований // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1966. № 4. С. 52–63.

Страхов В. Н. О решении обратной задачи в методе вертикальных электрических зондирований // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. № 4. С. 77–84.

Страхов В. Н., Карелина Г. Р. Об интерпретации данных ВЭЗ на ЭВМ // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1969. Вып. 56. С. 118–129.

Страхов В. Н. К вопросу о вычислении теоретических кривых кажущегося сопротивления в методе вертикального электрического зондирования на постоянном токе // Геология и геофизика, 1972. № 4. С. 89–99.

Страхов В. Н. К теории метода ВЭЗ // Геофизические изыскания. 1976. Вып. 2. С. 82–87.

Страхов В. Н. К проблеме построения алгоритмов решения прямых и обратных задач в методе ВЭЗ // Вопросы интерпретации геофизических полей. Деп. в ВИНТИ, № 1989-80. М.: 1980. С. 2–25.

Страхов В. Н. Проблемы математической геофизики XXI века // Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 9–59.

Табаровский Л. А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. Новосибирск: Наука, 1975.

Табаровский Л. А., Черяука А. В. Математическое моделирование электромагнитных полей в неоднородных анизотропных средах // Геология и геофизика. 1989. № 3. С. 96–100.

Тихонов А. Н. О единственности решения обратной задачи электроразведки // ДАН СССР, 1949. Т. XIX, № 6.

Тихонов А. Н. О регуляризации некорректно поставленных задач // ДАН СССР, серия «Математика». 1963. Т. 153. № 1.

Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с.

Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.

Топфер К. Д. Измерения с установкой Шлюмберже над моделями волнообразных структур // «Экспресс-информация. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика». М.: Всесоюзный институт экономики минерального сырья и геологоразведочных работ, 1972. № 20.

Уайлд Дж. Д. Методы поиска экстремума. М. 1967. 267 с.

Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. М.: Недра, 1987. 235 с.

Филатов В. А. Обратная задача электроразведки на постоянном токе для горизонтально-слоистой среды // Геология и геофизика. 1976. № 8.

Френкель М. А., Кацевич А. И. Корреляционный алгоритм приближенного решения обратной задачи электроразведки // Препринт АН СССР. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. 1989. № 49. 1–41.

Фролов В. Х. О возможности повышения геологической эффективности электроразведки // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1988. № 2. 140–147.

Хмелевской В. К. Электроразведка. М.: Издательство МГУ, 1984. 421 с.

Хмелевской В. К. Основы теории ПЭЗ // Геофизические исследования. М.: МГУ. 1964. Сб. 1.

Хмелевской В. К., Шевнин В. А. и др. Электрическое зондирование геологической среды. Интерпретация и практическое применение. Учебное пособие. М.: МГУ, 1988. Часть 1. 177 с.

Хмелевской В. К., Шевнин В. А. и др. Электрическое зондирование геологической среды. Интерпретация и практическое применение. Учебное пособие. М.: МГУ, 1994. Часть 2. 160 с.

Хуторянский В. К. Повышение геологической эффективности интерпретации ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в неоднородных средах // Повышение эффективности геофизических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых на основе математического моделирования. Новосибирск: 1986. С. 111–117.

Шевнин В. А. Опыт использования ЭВМ в учебном процессе по электроразведке // Известия ВУЗов. Сер. Геология и разведка 1985. № 12. С. 108–111.

Шевнин В. А. Прямые и обратные задачи электроразведки методом сопротивлений для изотропных и анизотропных сред. Диссертация докт. физ.-мат. наук (в форме доклада). Москва. 1995. 80 с.

Шеннон К. Связь при наличии шума. Работы по теории информации и кибернетики. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. С. 133–460.

Шкабарня Н. Г., Елисеенко Л. А. Об интерпретации кривых ВЭЗ на ЭВМ // Геология и разведка. № 11. 1964.

Шкабарня Н. Г., Куничкина Т. Г. Способы интерпретации кривых электрического зондирования с применением ЭВМ // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений. Пермь: ПГУ, 1965. № 6.

Шкабарня Н. Г., Гриценко В. Г. Интерпретация кривых электрического зондирования с применением ЭВМ. М.: Недра, 1971.

Шкабарня Н. Г. Автоматизированная интерпретация данных метода сопротивления и вызванной поляризации на основе математического моделирования в горизонтально-неоднородных средах. Диссертация докт. техн. наук. Москва. 1984. 252 с.

Шкабарня Н. Г., Севостьяненко В. П. Алгоритм расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для среды с наклонными границами // Проблемы автоматизации геофизических исследований. ДВНЦ АН СССР, 1985. 35–40.

Шкабарня Н. Г. Автоматизированная интерпретация кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в рудных районах // Разведка и охрана недр, 1986. № 11. С. 40–45.

Шкабарня Н. Г., Кияшко Г. А. Оценка влияния рельефа местности в методах вертикального электрического зондирования // Геология и геофизика. 1990. № 3. 134–139.

Электроразведка. Справочник геофизика. М.: Недра, ч. 1, 2, 1989.

Юкна Р. Д. Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на универсальных электронных цифровых вычислительных машинах // Ученые записки Рижского политехнического института. 1961. № 5.

Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. М.: Недра, 1982. 381 с.

Якубовский Ю. В., Данг Нгок Нам. Некоторые проблемы интерпретации результатов ВЭЗ // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1993. № 2. 121–127.

Яновская Т. Б., Порохова Л. Н. Обратные задачи геофизики. Л.: ЛГУ, 1983. 210 с.

Backus G., Gilbert P. Numerical application of formalism for geophysical inverse probleme // Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 1967. V. 13. P. 247–276.

Backus G., Gilbert P. Uniqueness in inversion of inaccurate gross Earth data // Phil. Trans. Roy. Soc., 1969. V. 266A. № 1173. P. 123–192.

Banerjee Buddhadeb, Sengupta B. J. Transformation of Dipolar, Wenner and tho-electrode curves to schlumberger apparen resistivity sounding curves // Geophys. Prospect. 1987. V. 35. № 4. P. 445–453.

Baranov V., Kunetz G. Potential distribution on a stratified medium // C. R. Akademie des Sciences, 247, 1958.

Barker R. D. The offset system of electrical resistivity sounding and its use with amulticore cable // Geophysical Prospecting, 1978. V. 29. P. 128–143.

Barker R., Moore J. The application of time-lapse electrical tomography ingroundwater studies // The Leading Edge. 1998. V. 17. P. 1454–1458.

Barta R. Interpretacia krevik vertikalneho sondovania na Samocinnom pocitaci // Sb. geol. ved. UG. 1974. № 12.

Barthes V., Vasseur G. Three-dimensional resistivity modelling by the integral equation method // Adv. Eur. Geoterm. Res. Proc. 2nd Jnt. Semin. Results EC Geoterm Energy Res. Strasburg. 1980. P. 854–876.

Basokur A. T. Transformation of resistivity sounding measurements obtained in one electrode configuration to another configuration by means of digital linear filtering // Geophys. Prospect. 1983. V. 31. № 4. P. 649–663.

Basokur A. T. A numerical direct interpretation method of resistivity soundings using the Peckeris model // *Geophys. Prospect.* 1984. V. 32. № 6. P. 1131–1146.

Basokur A. T. Automated 1D interpretation of resistivity soundings by simultaneous use of the direct end iterative methods // *Geophys. Prospect.* 1999. V. 47. № 2. P. 149–177.

Bailei N. J. L., Jobson A. M., Rodjers M. A. Bacterial degradation of crude oil comparison of field and experimental data // *Chemical geologi.* 1973. V. 11, P. 203–221.

Bichera M., Lacshmanan I. Fast automatic processing of resistivity soundings // *Geophys. Prospect.* 1976. V. 24. № 2.

Barker R. D. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays // *Geophysics.* 1989. № 8. P. 1031–1037.

Chiba J. Some improvements in the interpretation of vertical electric sounding curves // *Geophysical Prospecting.* 1986. 34, № 6. P. 913–922.

Das U. S., Verma S. K. Interactive computer interpretation of resistivity sounding measurements // *Geol. Surv. India. Spec. Publ. Ser.* 1983. № 2. Pt. 2. P. 421–434.

Dey A., Morrison H. E. Resistivity modelling for arbitrary shaped three-dimensional structures // *Geophysics.* 1979. V. 44. № 4. P. 753–780.

Ehrenburg D. O., Watson R. J. Mathematical theory of electrical flow in stratified media with horizontal, homogeneous and isotropic layers. *Trans. Am. Inst. Min. Metal. Eng.* 1932. P. 423–442.

Ghosh D. P. The application of filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements // *Geophys. Prospect.* 1971 a. V. 19. № 2.

Ghosh D. P. Inverse Filter Coefficients for the Computation of Apparent Resistivity Standard Curves for a Horizontally Stratified Earth // *Geophys. Prospect.* 1971. V. 19. № 4.

Gustafson Edvard P., Mc Euen Robert B. Minimizing interpretation ambiguities through of surface data // *Ground Water Monit. Rev.* 1987. 7. № 4. 101–113.

Griffiths D. H., Turnbull J. A. Multi-electrode array for resistivity surveying. *First Break* 3. 1985. № 7. 16–20.

Hadamard J. Sur les problems aux derivees partielles et leur signification physique. Bull. Univ. Princeton 13. 1902.

Hadamard J. Le probleme Cauchy et les equations aux derivees partielles lineaires hyperboliques. Hermann. 1932.

Hohman Gerald W., Raiche Arthur P. Inversion of conral-sourse electromagnetic data // Elektromagn. Meth. Appl. Geophys. Tulsa (Okla). 1987. Vol. 1. P. 469–503.

Johansen H. K. An interactive computer/graphic-display-terminal sistem for interpretation of resistivity soundings // Geophys. Prospect. 1975. 23. № 3. P. 449–458.

Johansen H. K. A man/computer interpretation sistem for resistivity soundings over a horisontalli stratifiert earth // Geophys. Prospect. 1977. 25. № 4. P. 667–691.

Keceli A. The direct technique of interpretation in the magnetotelluric methed // Geoexploration. 1983. V. 21. № 1. P. 65–71.

Koefoed O. A simi-direct method of interpreting observations // Geophys. Prospect. 1965. V. 13. № 2.

Koefoed O. The application of the kernel fansion in interpretation geoelectrical measurements. Geoeksploration menjgraph. Studgard. 1968. V. 1. № 2.

Kunetz G., Rocroi J. P. Tritment automatigie des sondegés electriques automatic processing of electrical soundings // Geophys. Prospect. 1970. V. 18. № 2.

Langer R. E. An inverse problem in differential equations // Am. Math. Soc. Bull. 1933. 39. 814–820.

Lee T. Direct interpretation of resistivity data over two-dimensional structurass // Geophys. Prospect. 1981. V. 29. № 3. P. 462–469.

Loke M. H., Barker R. D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting. 1996. V. 44. P. 499–523.

Marcuello A., Queralt P. Resistiviti inversion with apriori information // Geophys. Prospect. 1987. 35. № 5. P. 590–603.

Meinardes H. Numerical interpretation of resistiviti soundings over horesentelle berds // Geophys. Prospect. 1970. V. 18. № 13.

Mendelson Kenneth S., Cohen Morrel H. The effect of grain anisotropy on the electrical properties of sedimentery rocks // Geophysics. 1982. V. 47. № 2. P. 257–263.

Milner C. W. D., Rodgers M. A., Evans C. R. Petroleum transformations in reservoirs // Journal of geochemical exploration. 1977. № 7. P. 101–153.

Nivas Sri, Israil M. A simple method of interpretation of resistivity sounding data using exponential approximating of the kernel-function // Geophys. Prospect. 1987. 35. № 5. P. 548–567.

Onodera S. Numerical analysis of relative resistivity for a horizontally layered earth // Geophysics. 1963. V. 28. № 2.

Onodera S. An analytic interpretation of apparent resistivity sounding curve for a multiple layered earth // Mem. Fac. Eng. Kyushu Univ., 1970 V. 29. № 2.

Onodera S., Fukuda Michihira, Sasaki Yitaka. Interpretation and graphic representation of resistivity data using a curve plotter connected to a computer // Butsuri tanko, Geophys. Explor. 1980. V. 33. № 3. P. 116–126.

Orellana S. Properties and drawing of the so-called Dar Zarrouk curves // Geophysics. V. 28. № 1. 1963.

Pekeris C. L. Direct method of interpretation in resistivity prospecting // Geophysics. V. 5. 1940.

Radhumenshi S. S., Singh B. Resistivity sounding one horizontally stratified multi-layers Earth // Geophys. Prospect. 1986. V. 34. № 3. P. 409–423.

Roy K. K., Elliot H. M. Some observations regarding depth of exploration in d. c. electrical methods // Geoexploration. 1981. 19. № 1. P. 1–13.

Sato H. K. Potential field from a dc current source arbitrarily located in a non uniform layered medium // Geophysics. 2000. V. 65, № 6. P. 1726–1732.

Schulz R., Tezkan B. Interpretation of resistivity measurements over 2d structures // Geophys. Prospect. 1988. V. 36. № 8. P. 962–975.

Slichter L. B. The interpretation of resistivity prospecting method for horizontal structures // Physics. 1933. № 4.

Stefanescu S., Schlumberge C. M. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain couches horizontales homogènes et isotrope // J. de Physik. 1930. V. 1. № 4.

Szaraniec E. Uncertain resistivity sounding and equivalent models // Geophys. Prospect. 1982 a. V. 30. № 1. P. 127–137.

Szaraniec E. Use of the seismic dynamic deconvolution algorithm in direct resistivity interpretation // Geophys. Prospect. 1982. b. V. 30. № 6. P. 850–854.

Taeyong H., Dong-Joo M., Changsoo S., Sukjoon P. Electric resistivity inversion via reverse time migration algorithm of seismic data // 74 Annual Meeting of SEG and International Exposition. Tulsa (Okla): Soc Explor Geophys 2004. 704–707.

Vozoff K. Numerical resistivity analysis: horizontal layers // Geophysics. V. 23. 1958.

William D., Abelardo R., Andrew B., Douglas L. Electrical resistance tomography. Leading Edge. 2004. V. 23, № 5. 438–442.

Wu Xiaoping A. 3D finite element algorithm for DC resistivity modeling using the shifted incomplete Cholesky conjugate gradient method // Geophys. J. Int. 2003. V. 154, № 3. 947–956.

Yadav G. S., Singh C. I. New sets of direct and inverse schlumberger filter for resistivity sounding interpretation // Boll. geofis. teor. appl. 1985. № 108. 251–262.

Zohdy A. A. R. Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar-Zarrouk Functions. Geol. Survey Bulletin. 1313-E. Washington, 1975.

Zohdy A. A. R. A new method of the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves // Geophysics 1989. 54, № 2. 245–253.

Научное издание

Владимир Петрович КОЛЕСНИКОВ

**ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

«Научный мир»

Тел./факс (007)(495)291-28-47. E-mail: naumir@benran.ru

Internet: <http://bookish.iring.ru>

ЛР № 03221 от 10.11.2000

Подписано к печати 25.12.2006. Формат 60x90/16. Гарнитура Литературная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,5. Тираж 300 экз. Заказ .