

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА
МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Под редакцией В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина

Издательство
Московского университета

1994

ББК 26.325
Э 45
УДК 550.837.31

Авторы:

Акуленко С.А., Березина С.А., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Игнатова И.Д., Любчикова А.В., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Рыжов А.А., Симонс М.М., Смирнова Т.Ю., Шевнин В.А., Яковлев А.Г.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор М.Н.Бердичевский (МГУ);
доктор технических наук, профессор Ю.В.Якубовский (МГРА)

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Московского университета

Э 45 **Электроразведка методом сопротивлений**
/ Под. ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина: Учебное
пособие. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - 60 с.: ил.
ISBN 5 - 211 - 03303 - 5

В пособии отражено современное состояние метода сопротивлений; рассмотрены теоретические основы и физическое истолкование поведения электрических полей, методика изучения различных объектов, современные приемы расчета на персональных компьютерах прямых задач и интерпретации результатов с примерами из практики полевых работ в различных регионах.

Для студентов-геофизиков, аспирантов и специалистов, занимающихся электроразведкой.

077(02)-94-заказное

ББК 26.325

ISBN 5 - 211 - 03303 - 5

© Московский государственный университет, 1994

Введение	4
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ	6
1.1. Удельное электрическое сопротивление горных пород	6
1.2. Геоэлектрические модели	15
1.3. Установки метода сопротивлений	19
1.4. О соответствии данных электроразведки логнормальному закону распределения	25
1.5. Аппаратура для электроразведки методом сопротивлений	31
Глава 2. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ СРЕД	36
2.1. Обзор алгоритмов решения прямых и обратных задач электрических зондирований в горизонтально-слоистых средах	36
2.2. Линейные фильтры для расчета прямой задачи ВЭЗ	39
2.3. Прямая задача электрического зондирования горизонтально-слоистого разреза для произвольной установки	55
2.4. Решение обратной задачи ВЭЗ	57
Глава 3. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД	65
3.1. Основные типы искажений кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями	67
3.2. Полная модель и методика ее исследования	70
3.3. Способы исключения искажений, вызванных ППН	72
3.4. Примеры	75
Глава 4. ВЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА	84
4.1. Основы векторной съемки	84
4.2. Расчет электрического поля в горизонтально-слоистой среде	89
4.3. Пример наземной векторной съемки	98
Глава 5. ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД	104
5.1. Методика круговых наблюдений в анизотропных средах	107
5.2. Электрические зондирования над анизотропной средой, перекрытой слоем наносов	118
5.3. Вертикальный контакт двух анизотропных сред	134
5.4. Интерпретация данных кругового ЭП над анизотропным полупространством	142
Литература	152

ВВЕДЕНИЕ

Эта книга продолжает серию книг, посвященных методу сопротивлений [81]. Авторы полагают, что метод сопротивлений переживает в настоящее время период быстрого развития и перехода на новый качественный уровень. Модификация зондирования завоевывает неоднородные среды и успешно борется с приповерхностными неоднородностями. Рост исследований в области экологии приводит геофизиков в города, на промышленные предприятия, в условия искусственных техногенных или сильно нарушенных грунтов с высоким уровнем неоднородности физических свойств, а также в условия резкого уменьшения свободной для производства работ открытой поверхности земли. В таких ситуациях развиваются и находят все более широкое применение технологии исследований геологической среды с подавлением геологических помех, векторные измерения.

При исследовании анизотропии, с одной стороны, развиваются методики ее изучения, а с другой стороны, все больше фактов говорит о том, что недоучет анизотропии среды может приводить к неверным геологическим выводам при истолковании результатов профилирования, зондирования или скважинных наблюдений, требует дальнейшего развития теории анизотропных сред.

Прогресс в области аппаратуры делает измерения более производительными, помехоустойчивыми и точными, с запоминанием результатов в цифровой форме в памяти прибора, многоканальными (от 25 до 960 каналов). Многоканальная аппаратура не очень подходит для разрозненных и произвольно размещенных зондирований, а наши исследования показывают и бесперспективность таких зондирований. Современная технология требует выполнения регулярных по профилю или площади детальных наблюдений и применения многоканальной и автоматизированной аппаратуры. Много публикаций в странах запада посвящено этой новой, но все шире используемой модификации электроразведки, часто называемой Electrical Imaging или Electrical Tomography. Наш опыт в области метода ВЭЗ можно выразить в двух фразах: 1) одно зондирование ничего не дает, полезная информация может быть получена лишь от профиля ВЭЗ в результате совместной интерпретации всех зондирований; 2) практически все зондирования искажены приповерхностными неоднородностями;

поэтому необходимо перед интерпретацией ВЭЗ убрать хотя бы часть этих искажений из наблюдаемых данных.

Авторы хотели бы поделиться своим опытом интерпретации зондирований в сложно построенных неоднородных средах, рассказать о целой технологии компьютерной обработки и интерпретации данных. Появление персональных компьютеров с многоцветной разнообразной визуализацией геофизических полей принципиально изменило возможности обработки и интерпретации геофизических данных. Авторы на своем опыте почувствовали, как развитие теории прямых и обратных задач геофизики изменяет методики геофизических наблюдений, позволяет решать более сложные геологические задачи, а работа в сложных геологических условиях в свою очередь требует дальнейшего развития теории и программного обеспечения. Содержание настоящей книги очень тесно связано с компьютерными программами, разработанными на кафедре геофизики геологического факультета МГУ для метода сопротивлений. Эти программы внедрены в нескольких десятках научных, учебных и производственных организаций России и других стран, широко используются при обучении студентов и для планирования работ и интерпретации результатов наблюдений на кафедре геофизики.

Материалы освещенные в этой книге широко используются в учебных курсах по электроразведке, читаются студентам и аспирантам, используются на учебных практиках, в курсовых и дипломных работах. По мнению авторов, метод сопротивлений идеально подходит для учебного процесса. Относительная простота аппаратуры и методики, малые глубины и высокая производительность, простота теории и возможность внести свой вклад в ее развитие, привлекают студентов и создают им реальные условия для реализации своих способностей.

Исследования, изложенные в главе 3, выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-05-17398).

Текст книги набран с помощью редактора Word Perfect, v.5.1.

Авторы просят отзывы и замечания об этой книге присылать по адресу: 119899, Москва, Ленинские горы, МГУ, геологический факультет, кафедра геофизики, или сообщить по тел. (095)-939-49-63, факсу (095)-939-43-70, электронной почте: Sh@geophys.geol.msu.su.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

1.1. УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород зависит от внутренних (минеральный состав и строение) и внешних (водонасыщенность, температура, трещиноватость) факторов. При изучении верхней части геологического разреза в процессе инженерно-геологических исследований приходится иметь дело с горными породами преимущественно осадочного происхождения, не содержащих больших включений электропроводящих минералов. В этом случае преобладает влияние на УЭС горных пород внешних факторов. В процессе изучения УЭС приходится использовать те или иные модели зависимости удельного сопротивления породы от определяющих УЭС факторов. В литературе можно встретить немало таких моделей, среди которых нам бы хотелось отметить три.

1. Модель Арчи - Дахнова. Эта модель известна давно и широко используется на практике. Основными факторами в этой модели считаются УЭС поровой влаги ρ_p и пористость породы:

$$\rho_n = P \cdot \rho_p, \quad (1)$$

где ρ_n - УЭС породы, а P - параметр пористости, связанный с коэффициентом пористости n соотношением $P = a/n^m$, а - структурный коэффициент ($0.5 < a < 1$), m - показатель цементации

($1.3 < m < 2.3$). В.Н.Дахнов [16] включил в эту формулу большее число определяющих УЭС факторов:

$$\rho_n = P_n \cdot P_p \cdot P_m \cdot P_t \cdot V_d \cdot P_t \cdot \rho_p, \quad (2)$$

где P_n - параметр пористости, P_p - параметр влажности, P_m - параметр, учитывающий наличие электропроводящих минералов, P_t - параметр, учитывающий поверхностную проводимость (глинистость), V_d - параметр зернистости, P_t - параметр температуры, ρ_p - УЭС поровой влаги.

Формула (2) не вскрывает сущность УЭС, но с помощью эмпирических коэффициентов, подобранных для определенного региона и типа пород может на макроуровне довольно точно и просто отражать связи УЭС с определяющими его фактора-

ми. Влияние каждого фактора относительно независимо от других, а форма их совместного влияния хорошо соответствует логнормальному закону распределения УЭС (см. раздел 1.4). На основе этой модели студентом МГУ А.В.Волковым разработана программа LITOS для расчета УЭС растворов и горных пород.

2. Модель И.К.Овчинникова - А.С.Семенова, модифицированная А.В.Тимохиным (Екатеринбург). Связи УЭС и строения породы рассматриваются аналогично рассмотренной выше модели на макроуровне, но отдельно для грунтов-агрегатов четырех групп, различающихся по количеству и набору физико-механических характеристик (ФМХ), влияющих на УЭС грунтов: 1) осадочные (нескальные) грунты; 2) скальные и крупнообломочные; 3) мерзлые осадочные (нескальные); 4) мерзлые скальные и крупнообломочные грунты. В первой группе рассматриваются следующие грунты: песок, супесь, суглинок, глина. Полный набор ФМХ представлен четырьмя величинами: процентным содержанием глинистой фракции в грунте ($C_{гл}$, %), степенью влажности (G , доли единицы - далее везде д.е.), пористостью (n , д.е.), удельным электрическим сопротивлением воды (ρ_v , Ом.м).

Песчано-глинистый грунт рассматривается в виде пятикомпонентной системы. Неглинистые частицы в грунте - в виде сферических непроводящих ток частиц двух размеров, отличающихся на порядок. Между ними расположены глинистые частицы эллипсоидальной формы произвольной ориентировки, электропроводность которых определяется проводимостью двойного электрического слоя, покрывающего их и образующегося на контакте глинистых частиц с водой. Все твердые фракции окружены водой с включением сферических пузырьков воздуха. На поверхности раздела фаз могут возникать промежуточные фазы с аномальными физико-химическими свойствами, от которых зависит сопротивление смеси. Предлагаемая модель учитывает основные факторы, влияющие на сопротивление нескальных грунтов.

При выборе модели за основу были приняты: уравнение, полученное И.К.Овчинниковым для двухкомпонентных сред с эллипсоидальными включениями, и способ последовательного заполнения, предложенный А.С.Семеновым.

Предполагается, что мелкие песчаные, а также глинистые частицы и вода с пузырьками воздуха являются наполнителем

биминеральной среды, а крупные частицы - сферическими включениями с бесконечно большим сопротивлением. В этом случае сопротивление породы выразится формулой:

$$\rho_n = (3 - w_1) / (2w_1 \cdot \rho_1), \quad (3)$$

где w_1 - относительное содержание заполнителя, $w_1 = 1 - \kappa(1 - n)$, κ - отношение объема основной (крупной) фракции ко всему объему скелета грунта (д.е.); ρ_1 - удельное электрическое сопротивление заполнителя (Ом.м); n - пористость (д.е.).

В свою очередь заполнитель также рассматривается как биминеральная среда, где включениями служат сферические песчаные частицы, а заполнителем - оставшийся состав смеси с сопротивлением $\rho_1 = (3 - w_2) / (2w_2 \rho_2)$, где w_2 - относительное объемное содержание заполнителя (д.е.), $w_2 = [n + C_{гн}(1 - n)] / [1 - \kappa(1 - n)]$, где $C_{гн}$ - содержание глинистой фракции в грунте (д.е.).

Затем в качестве включений рассматриваются глинистые частицы, а в качестве заполнителя - вода с пузырьками воздуха. Для случая эллиптических включений произвольной ориентировки сопротивление биминеральной среды может быть рассчитано с помощью уравнений И.К.Овчинникова

$$\rho_2 = 3\rho_3(ABC) / [3ABC + 2(1 - w_3) \cdot d\rho \cdot (AB + AC + BC)], \quad (4)$$

где ρ_3 - удельное электрическое сопротивление заполнителя (Ом.м); $d\rho = \rho_3 - \rho_{гн}$; $\rho_{гн}$ - сопротивление глинистых частиц, покрытых связанной водой (двойным электрическим слоем); $A = abcA(0) \cdot w_3 \cdot d\rho + 2\rho_{гн}$, $B = abcB(0) \cdot w_3 \cdot d\rho + 2\rho_{гн}$, $C = abcC(0) \cdot w_3 \cdot d\rho + 2\rho_{гн}$, где w_3 - относительное объемное содержание заполнителя (д.е.). Выражения $abcA(0)$, $abcB(0)$, $abcC(0)$ зависят только от отношения полу-осей эллипсоидов a, b, c и для подобных эллипсоидов одинаковы.

А.В.Тимохиным разработан пакет программ "Кобра" для расчета УЭС перечисленных типов горных пород по их физико-механическим характеристикам. Программы используются при инженерно-геофизических изысканиях для обработки данных инженерно-геологических наблюдений и ВЭЗ. Специализация моделей для определенных типов горных пород повышает точность их инженерно-геофизических оценок.

3. Модель А.А.Рыжова. А.А.Рыжов (ВСЕГИНГЕО) для вычисления удельного сопротивления и поляризуемости песчано-глинистых пород использует модель породы, состоя-

щей из твердого скелета, системы пор определенного азмера, заполненной полностью или частично водными астворами солей и глинистых частиц, которые могут находиться как на стенках пор в виде пленок, так и в самих порах в виде пробочек [59,60]. Модель основана на использовании строгих формул физико-химической теории для двойного электрического слоя на границе твердой и жидкой фаз. Высокая степень соответствия модели А.А.Рыжова многим экспериментальным данным по исследованию электрических свойств горных пород говорит о правомерности такого подхода.

Для расчета УЭС используются следующие формулы:

$$\sigma_n = \frac{2zFK_n}{r_1^2} \int_0^{r_1} r \left[U_{\kappa} \cdot C_{\kappa n} \cdot \exp\left(\frac{-C_{\kappa n}}{1000 \cdot ZN}\right) + U_a \cdot C_{an} \cdot \exp\left(\frac{-C_{an}}{1000 \cdot ZN}\right) \right] dr, \quad (5)$$

$$\sigma_a = \frac{2zFK_a}{r_2^2} \int_0^{r_2} r \left[U_{\kappa} C_{\kappa a} \cdot \exp\left(\frac{-C_{\kappa a}}{1000 \cdot ZN}\right) + U_a C_{aa} \cdot \exp\left(\frac{-C_{aa}}{1000 \cdot ZN}\right) \right] dr, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{K_a \cdot \sigma_a}{K_n \cdot \sigma_n + K_a \cdot \sigma_a} \cdot 100, \quad (7)$$

где σ_n , σ_a (См/м) - удельная электропроводность пород, связанная с распределением активных и пассивных капилляров; K_n , K_a (отн. ед.) - пассивная и активная пористость образца; r_1 , r_2 (м) - радиусы пассивных и активных капилляров; Z - валентность ионов; F (Кл/моль) - число Фарадея; U_a , U_{κ} (м²/с.В) - подвижность анионов и катионов, $C_{\kappa n}$, C_{an} (моль/м³) - концентрация катионов и анионов вдоль направления, совпадающего с направлением радиуса в пассивном капилляре; $C_{\kappa a}$, C_{aa} - то же в активном капилляре, все C - функции r , N - число гидратации для конкретного катиона вещества, находящегося в водном растворе; η (%) - поляризуемость среды.

Если исключить K_n и K_a в формулах (5,6), то получим вариант для расчета удельной электропроводности жидкости в

капиллярах, которая может существенно отличаться от электропроводности жидкости в свободном от влияния стенок капилляра растворе (электронейтральный раствор) за счет поверхностной проводимости. В свою очередь влияние поверхностной проводимости на электропроводность жидкости в капилляре обусловлено толщиной двойного слоя и радиусом капилляра, а также концентрацией катионов и анионов в двойном слое.

Для расчета концентраций $C_{кi}$, C_{ai} , ($i \in к, а$), входящих в формулы (5,6) используется формула Больцмана:

$$C_{кi}(x) = C_{кo} \cdot \exp\left(\frac{-ZF}{RT} \cdot \psi(x)\right), \quad (8)$$

$$C_{ai}(x) = C_{ao} \cdot \exp\left(\frac{-ZF}{RT} \cdot \psi(x)\right), \quad (9)$$

где $C_{кo}$, C_{ao} (моль/м³) - концентрация катионов и анионов в электронейтральном растворе; R (Дж/К.моль) - газовая постоянная; T (°К) - температура; $\psi(x)$ - электрический потенциал, наблюдаемый на расстоянии x от стенки капилляра.

Значение $\psi(x)$ определено путем решения нелинейного уравнения:

$$\text{th}\left(\frac{ZF}{4RT} \cdot \psi\right) = \text{th}\left(\frac{ZF}{4RT} \cdot \psi_1\right) \cdot \exp(-\kappa x), \quad (10)$$

где ψ_1 - потенциал Штерна (В); $\kappa = \sqrt{2CZF/\varepsilon RT}$ - величина обратная дебаевскому расстоянию (м⁻¹); x - расстояние от стенки капилляра (м), ε - диэлектрическая проницаемость. Так как $Z, F, R, T, \psi_1, \kappa, x$ в уравнении (10) известны, то используя метод Фибоначчи, можно добиться равенства левой и правой частей. Численное интегрирование в формулах 5 и 6 выполнялось по методу Симпсона.

Значение ψ_1 - потенциала для заданной концентрации электронейтрального раствора вычислялось путем решения системы нелинейных уравнений относительно ψ_1 потенциала:

$$\text{Sh}(ZF\psi_1/2RT) = \sqrt{\pi/2\varepsilon RT C} \cdot \sum_{k=1}^M Z_k F \Gamma_k; \quad (11)$$

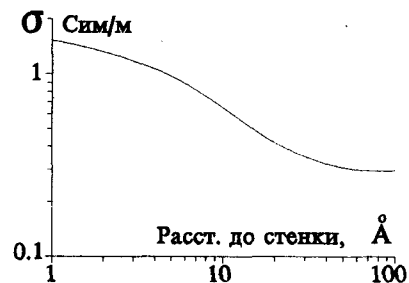
$$\Gamma_k = \Gamma_{ок} \cdot \frac{N \cdot \exp(-\Phi_k \pm ZF\psi_1/RT)}{1 + N \cdot \exp(-\Phi_k \pm ZF\psi_1/RT)}, \quad (12)$$

где Γ_k - степень адсорбции ионов на поверхности, моль/м²; $\Gamma_{ок}$ - предельное число мест адсорбции ионов на единице поверхности, моль/м², $\Phi_k = ZF\psi_k/RT$ - безразмерный потенциал, характеризующий потенциал ψ_k специфической адсорбции, В; N - относительная степень адсорбции; M - число веществ в растворе.

При решении системы (11-12), в результате проверки формул (11 и 12) на экспериментальном материале, следующие значения приняты в виде констант: $\Gamma_{ок} = 3.5 \times 10^{-7}$ (моль/м²); $\Phi_1 = 0$; $N = 1$; $M = 1$.

На рис.1.1.1 изображено строение двойного слоя $C_k = f(x, c)$, $C_a = f(x)$ и изменение электрического потенциала ψ в зависимости от расстояния x от стенки капилляра (в ангстремах, 1 ангстрем = 10^{-10} м) и концентрации C_o электронейтрального раствора. Расчеты выполнены по формулам 8-12.

При приближении к стенке капилляра концентрация катионов растет (на 1-1.5 порядка), а концентрация анионов убывает, что существенно нарушает электронейтральность раствора вблизи границы твердая фаза - жидкость. Значительная концентрация свободных зарядов вблизи границы раздела существенно повышает электропроводность двойного слоя, в результате электропроводность жидкости с уменьшением радиуса капилляров возрастает и существенно отличается от электропроводности электронейтрального раствора. Например, при сближении двойных слоев, расположенных на противоположных стенках круглого или щелевого капилляров, Рис.1.1.2. Зависимость σ от удельная электропроводность расстояния до стенки капилляра



жидкости будет зависеть только от распределения катионов и анионов в двойном слое. Следовательно, имеются предпосылки для оценки размеров капилляров в тонкодисперсных средах по измеренному значению удельной электропроводности пород. На рис.1.1.2 показано изменение электропроводности жидкости на разных расстояниях от стенки капилляра ($C=1$ г/л NaCl). Толщина двойного слоя (как расстояние, на котором концентрация изменяется в e раз) уменьшается с ростом концентрации. В концентрированных растворах (с C больше 100 моль/м³) влиянием двойного слоя можно пренебречь (и пользоваться при расчетах УЭС породы более простой формулой).

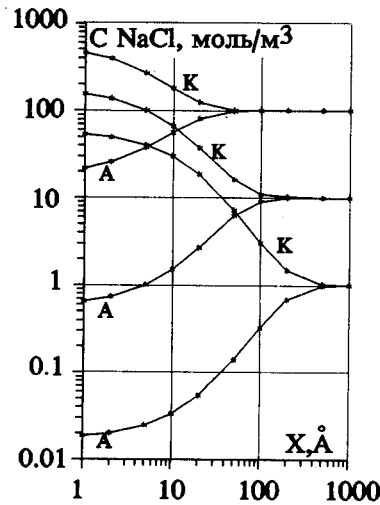


Рис.1.1.1. Структура двойного электрического слоя

Электропроводность активных и пассивных пор, а также соответствующие им коэффициенты пористости K_A и K_P определяют величину поляризуемости. Измерение поляризуемости создает предпосылки для изучения "тонких" структур в глинах и других горных породах.

По формулам (5-6) можно рассчитать удельное электрическое сопротивление простейших смесей типа песок-глина. Упрощая модель горной породы, представим, что радиус капилляров песка r_n , а радиус капилляров в глинах r_r . В природе радиусы пор (капилляров) распределены в некотором интервале, который можно охарактеризовать законом распределения, средними значениями и дисперсией. В этом случае радиусы r_n и r_r можно понимать как средний (эффективный) радиус. Пусть пористость песка K_n , глины K_r , и глина "размазана" по стенкам капилляров песка (1 тип) или глина находится в капиллярах в виде пробочек, перегородывающих внутреннюю часть поры песка (2 тип). Электропроводность смеси в первом случае будет:

$$\sigma_{\Sigma 1} = \sigma_n (1 - C_r) + C_r (\sigma_r + \sigma_{ro}), \quad (13)$$

а во втором случае:

$$\sigma_{\Sigma 2} = \frac{1}{\frac{(1 - C_r)}{\sigma_n} + \frac{C_r}{\sigma_r + \sigma_{ro}}}, \quad (14)$$

где $\sigma_{\Sigma 1}$ - удельная электропроводность смеси песка с глиной, См/м; σ_n - удельная электропроводность песка, рассчитанная по формуле (5); σ_r - то же, но для глины; σ_{ro} - то же, но обусловленная ионно-обменной емкостью (особым типом проводимости пространства между частицами глины); C_r - объемное содержание глины в отн. ед. Ионно-обменная емкость (ИОЕ) глин обеспечивает особое поведение УЭС глин при изменении концентрации солей в поровой жидкости. Значение ИОЕ может изменяться от 1 до 100 моль/м³. Влияние ИОЕ приводит к дополнительному уменьшению УЭС. В песке влияние ИОЕ тоже сказывается, но лишь при малых концентрациях солей в растворе ($C < 0.01$), а у глины при $C > 1$. Интересно отметить, что ИОЕ глин обусловлена главным образом свойствами первичного раствора, из которого осаждалась глинистая порода в момент ее образования. Таким образом в ИОЕ "запоминается" состав и концентрация исходного раствора, поэтому изучение ИОЕ может помочь уточнить генезис глин.

Как показывает практика, при малом содержании глины эффективнее использовать для расчетов формулу (13), а при большом (свыше 30-40%) содержании глины - формулу (14).

Выдвинув гипотезу, что $M\%$ капилляров песка заполнены глиной по первому типу, а $(1-M)\%$ капилляров по 2 типу, можно использовать следующую формулу:

$$\sigma_{\Sigma} = (1 - M) \cdot \sigma_{\Sigma 1} + M \cdot \sigma_{\Sigma 2}, \quad (15)$$

где σ_{Σ} - удельная электропроводность сложной смеси

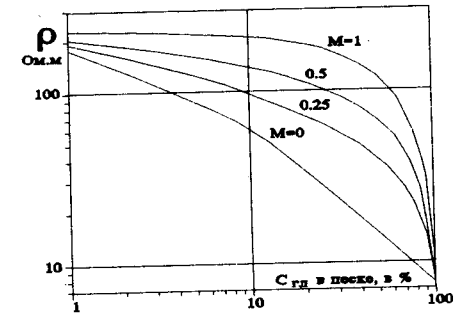


Рис.1.1.3 Зависимость УЭС смеси песка с глиной от M и $C_{гп}$

песка с глиной.

На рис.1.1.3 показана зависимость УЭС смеси песка с глиной при постоянной концентрации солей (0.1 г/л) в водном растворе NaCl для различных значений M и C_r , рассчитанная по формуле (15). Расчеты проведены по программе А.А.Рыжова "Петрофизика" для глины - монтмориллонита с $K_n=0.55$, $r_1=0.005$ мкм, для песка $K_n=0.25$, $r_1=0.1$ мм. При значении $M=0$ - вся глина распределена на стенках капилляров, а при $M=1$ - сосредоточена в глинистых пробочках. Когда глина "размазана" по стенкам капилляров в песчаной породе, небольшое увеличение содержания глины заметно меняет УЭС смеси (в логарифмическом масштабе почти пропорциональная зависимость). В случае "пробочек" глины, наоборот, значительные изменения содержания глины в интервале от 1 до 20% практически не сказываются на величине УЭС, но резко влияют в интервале 20 - 100%. На практике глина в песке находится в форме как первого, так и второго типа, что и отражает формула 15. Экспериментальные исследования люберецкого песка показали, что для него величина M близка к 0.1.

На рис.1.1.4 приведена зависимость УЭС песчано-глинистой смеси от минерализации подземных вод и степени глинистости, рассчитанная по формуле (15) при $M=0.1$ и следующих параметрах: раствор NaCl, число гидратации $N=0.3$, число адсорбции $\Gamma_{01}=3.5 \times 10^{-7}$, для песка $K_n=0.25$, $r=0.1$ мм; для глины $K_n=0.55$, $r=0.005$ мкм. При уменьшении концентрации соли в растворе сильнее влияет ДЭС и ИОЕ, поэтому с ростом концентрации глины графики рис. 1.1.4. все сильнее отклоняются от линии песка. В области больших концентраций (> 30 г/л) наклон всех кривых меняется, так как при увеличении содержания соли количество ионов в растворе возрастает слабо.

Зависимости рис.1.1.4 рассчитаны для NaCl. Для песка и глины от C_{NaCl}

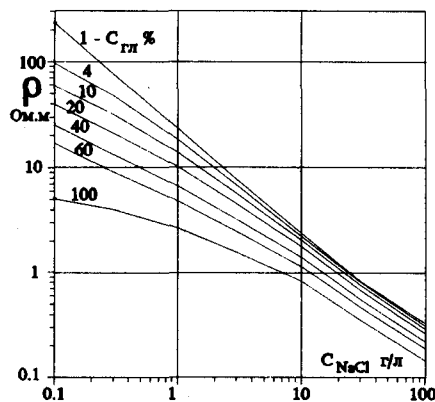


Рис. 1.1.4 Зависимость УЭС смеси

других типов вод (сульфатно-магниевых, хлоридно-кальциевых) эти зависимости несколько изменятся.

Программа А.А.Рыжова "Петрофизика" позволяет вести расчет электрических свойств природных вод, песка, глины, их смесей и других горных пород (УЭС, поляризуемость, диэлектрическую проницаемость, волновое число, скорости распространения электромагнитных волн) и т.д. В приведенных выше примерах мы ограничились только УЭС с учетом тематики книги. Главным достоинством подхода А.А.Рыжова является высокая точность оценок свойств в широком диапазоне значений параметров. Недостаток - сложность понятий физико-химической теории, с которыми трудно иметь дело геофизику - практику, недостаточная документированность алгоритма и программы, большое число входных параметров. Но этот подход незаменим при глубоких исследованиях электрических свойств горных пород.

Анизотропия электрического сопротивления рассмотрена в главе 5.

1.2. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Геоэлектрическая модель среды является фундаментальным понятием электроразведки, так как лежит в основе решения прямых и обратных задач. Самая простая модель в электроразведке - это однородное безграничное проводящее пространство. Решение задачи о точечном источнике постоянного тока для такой модели показывает распределение потенциала и составляющих плотности тока и напряженности поля. Тип модели определяет выбор системы координат, в которой удобнее решать задачу. В данном случае - выбор сферической системы координат с центром в источнике является физически наиболее удобным. Применимость такой модели среды весьма ограничена.

Следующим приближением к реальным условиям электроразведки является модель двух полупространств, или модель "земля - воздух". Подразумевается, что полупространство заполненное воздухом обладает бесконечно высоким сопротивлением, а земля - конечным - ρ_1 . Точечный (или иной) источник тока располагается на плоской поверхности земли или внутри нее. Для описания такой модели удобно использовать прямоугольную систему координат с осью Z , направленной вниз. Эта

модель позволяет ввести понятие нормального поля, кажущегося сопротивлением, при изучении неоднородных сред модель однородного проводящего полупространства служит базой для разделения поля на нормальную и аномальную составляющие.

Теперь рассмотрим геоэлектрические модели неоднородных сред. Наиболее сильные изменения свойств геологической среды происходят по вертикали, как в планетарном масштабе (осадочный чехол, земная кора, мантия), так и при более детальных исследованиях (слоистые осадочные толщи, смена электрических свойств пород с глубиной под влиянием изменений влажности, выветривания и т.д.). Поэтому следующей по сложности после модели однородного полупространства можно считать модель среды с изменением удельного сопротивления только по вертикали. Ее называют одномерной моделью (1D) или моделью $\rho = \rho(z)$. В этой модели различают два случая: когда $\rho(z)$ меняется непрерывно (градиентная одномерная модель) и когда $\rho(z)$ - кусочно-постоянная функция (горизонтально-слоистая модель). Модель горизонтально-слоистой среды является традиционной и базовой для методов электрических зондирований, таких как ВЭЗ, ДЭЗ и др.

Следующей по сложности геоэлектрической моделью неоднородной земли является двумерная модель $\rho = \rho(x, z)$ (или 2D). Внутри этой модели можно выделить несколько частных случаев. Простейшими из них являются вертикальный контакт и горизонтальный цилиндр, более сложными - вертикальный пласт (жила) и вертикально-слоистая среда. Эти модели являются базовыми для различных модификаций электропрофилеирования. Общим случаем двумерной модели является разрез с произвольным распределением $\rho(x, z)$, в котором ρ может являться как кусочно-постоянной функцией $\rho(x, z)$, так и непрерывной (градиентной).

Наиболее сложная фундаментальная геоэлектрическая модель - трехмерная, когда $\rho = \rho(x, y, z)$ (или 3D). Простейшие частные случаи такой модели - локальные трехмерные тела (шар, эллипсоид, параллелепипед), помещенные в однородное полупространство. Более сложными случаями являются сочетания локальной трехмерной неоднородности, находящейся в одномерном или двумерном геоэлектрическом разрезе. Наиболее общий случай - модель произвольного трехмерного распределения УЭС, как кусочно-постоянного, так и градиентного.

Роль фундаментальных геоэлектрических моделей можно пояснить с помощью понятий прямой и обратной задачи геофизики. Под прямыми задачами понимают определение (расчет) полей по известному распределению свойств среды и источников поля. Под обратными - нахождение распределения свойств среды по известному полю. Основное назначение геофизики при исследовании практических геологических ситуаций - это решение обратной задачи. Но решение обратной задачи может быть получено только для тех ситуаций, для которых решены соответствующие прямые задачи. Тем самым потенциальные возможности геофизических методов определяются набором решенных на сегодняшний день прямых задач.

Реальная геологическая среда всегда трехмерна, так как трехмерно окружающее нас физическое пространство. Но вести интерпретацию в рамках трехмерных моделей очень трудно и для конкретных сложных ситуаций не всегда возможно. Во многих случаях в этом и нет необходимости. Чаще геоэлектрическая ситуация в масштабе решаемой задачи удовлетворительно описывается (аппроксимируется) более простыми моделями, обладающими меньшей размерностью (двумерными или одномерными). Понижение размерности обратной задачи существенно упрощает ее: уменьшает число определяемых параметров и соответственно вычислительные затраты; снижает требования к количеству экспериментальных данных; уменьшает неоднозначность решения обратной задачи (в рамках модели).

При исследовании сложно-построенных сред широко используются понятия нормальной и аномальной составляющих наблюдаемого поля. Нормальное поле является решением прямой задачи для некоторой упрощенной модели среды, называемой нормальным разрезом. Под аномальной частью поля понимают составляющие поля, связанные с отклонением среды от нормального разреза. В электроразведке в качестве нормального разреза наиболее широко используются модели однородного полупространства и горизонтально-слоистого разреза. Но в принципе, в качестве нормального разреза можно использовать и другие модели. Например, для двумерной среды с локальной трехмерной неоднородностью в качестве нормальной модели удобно использовать двумерную среду.

Последовательность все усложняющихся нормальных моделей можно считать нормальным рядом моделей. В таком ряду прямая задача для каждой следующей модели может быть решена на основе решения предыдущей, более простой задачи. Примерами таких нормальных рядов моделей можно считать: полупространство - вертикальный контакт - вертикально-слоистую среду; полупространство - двухслойную модель - слоистую модель с произвольным числом слоев, слоистую модель с включенными в нее локальными неоднородностями. В общем случае ряд 1D - 2D - 3D можно также рассматривать как нормальный ряд моделей.

В главе 3 используется набор моделей, включающих три основные компоненты: горизонтально-слоистую среду, глубинные 2D или 3D объекты, и приповерхностные неоднородности-помехи.

До сих пор модели о которых шла речь считались изотропными (то есть предполагалось, что электрические свойства каждого слоя (тела) модели не зависят от направления). Реальные среды часто обладают электрической анизотропией, когда их свойства зависят от направления протекания тока. Добавление анизотропии является усложнением модели и последовательности изотропная - анизотропная модели можно рассматривать как части нормального ряда моделей. В тех случаях, когда свойства среды меняются под влиянием анизотропии в координатах (X, Y) исследования анизотропии можно вести с помощью кругового электропрофилеирования (или зондирования), когда электроразведочная установка без изменения точки записи меняет свою ориентацию в плоскости наблюдений. Наиболее простой (нормальной) моделью анизотропной среды является анизотропное полупространство (с вертикальным или наклонным положением плоскости анизотропии). Более сложными моделями - вертикальный контакт двух анизотропных полупространств, слоистая модель со своей ориентацией анизотропии в каждом слое и т.д.

Модели в которых преобладают изменения свойств среды с глубиной обычно изучаются методами электрических зондирований. Модели с преобладающим изменением свойств по горизонтали - методами электрического профилирования. Модели с анизотропией свойств в горизонтальной плоскости - круговыми наблюдениями (профилеированием или зондированием). Эта классификация моделей и применяемых для их

изучения модификаций электроразведки и положена в основу данной книги.

1.3. УСТАНОВКИ МЕТОДА СОПРОТИВЛЕНИЙ

Термин "Установка" в методе сопротивлений используется для обозначения взаимного расположения питающих (A,B) и приемных (M,N) электродов. Выбор установки является важнейшим элементом методики электроразведки задач, технологических условий, используемой аппаратуры, глубинности исследований, уровня помех. Хотя за время существования метода было предложено большое количество различных установок, новые варианты продолжают появляться и эта тема кажется неисчерпаемой. Рассмотрим основные типы установок и некоторые соображения их выбора.

По числу движущихся или "рабочих" электродов различают установки двухэлектродные (AM), трехэлектродные (AMN, MAN), четырехэлектродные (AMNB, ABMN и др.) и многоэлектродные (рис.1.3.1):

1) симметричная четырехэлектродная градиентная установка Шлюмберже ($MN \ll AB$), 2) установка Веннера ($MN = AB/3$), 3) дипольная осевая ($r = OO', AB, MN < r$), 4) комбинированная ($AMN + MNB$), т.е. объединяющая две трехэлектродных, 5) двухэлектродная потенциал-установка AM, 6) установка MAN ($MA = AN$), 7) установка В.Х.Фролова [73], 8) установка "метода двух составляющих" (МДС) А.Н.Боголюбова [7], 9) дипольная экваториальная установка (см. гл. 5), 10) установка "триполь" (см. гл. 5), 11) двухкомпонентная (X,Y) установка (см. гл. 4,5). Список установок можно продолжать долго. Например установка Шлюмберже часто используется для ЭП с двумя разносами питающих электродов, различающимися в 2-4 раза. При этом обработка результатов измерений (а вообще говоря и сами измерения) могут проводиться по методике "вычитания полей" [57]:

$$\rho_s = \rho_k^2 / [\rho_k - r (\partial \rho_k / \partial r)] . \quad (16)$$

По этой же методике могут трансформироваться кривые ВЭЗ.

Метод сопротивлений используется для трех основных ви-

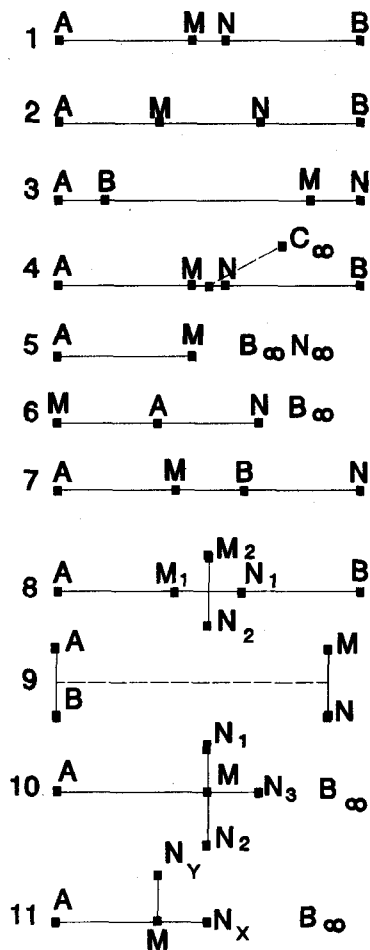


Рис.1.3.1. Виды установок метода сопротивлений

При ЭП по разному ведут себя дипольная осевая и симметричная градиентная установка Шлюмберже (рис.1.3.3). Токовые линии в установке СЭП в пространстве под MN идут горизонтально, а в AM и AMN установок

дов исследований: зондирования, профилирования и изучения анизотропии негоризонтальных напластований круговым ЭП. В каждом из них свои критерии выбора установок.

Например для зондирования горизонтально-слоистых сред установки Шлюмберже и дипольная экваториальная теоретически эквивалентны, а для изучения анизотропии негоризонтальных напластований резко различны: первая дает эллипс анизотропии с отношением λ , а вторая - пропорциональный λ^5 (см. главу 5). При профилировании наибольшие отличия имеют градиентные и потенциальные установки: первые на контактах сред с разными сопротивлениями дают резкие аномалии, так как напряженность поля терпит разрыв, а вторые - более плавные аномалии, так как потенциал на тех же границах непрерывен (рис.1.3.2).

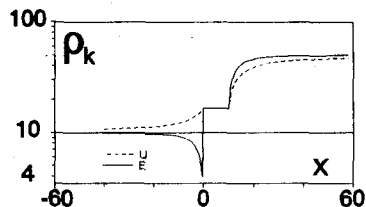


Рис.1.3.2. Графики ЭП для

установке ДОП почти вертикально. Поэтому вертикальный пласт высокого сопротивления сильнее проявится в установке СЭП, а проводящий пласт - в ДОП (за счет концентрации токовых линий). Тонкий горизонтально лежащий проводящий пласт сильнее отразится в установке СЭП, а плохопроводящий - в ДОП.

Установка ДОП нашла широкое применение для ЭП, а ДЭП - для зондирования и круговых исследований анизотропных сред. Дипольные установки используются при глубинных электрических зондированиях, т.к. требуют меньшей длины проводов, меньше подвержены индукционным влияниям, но нуждаются в мощных источниках тока.

Установка срединного градиента обеспечивает максимальную производительность, возможность работы с несколькими измерителями одновременно, но требует более мощных источников тока.

Выбор установок определяется характером решаемых задач, а более узко - моделью среды. Бесчисленное разнообразие моделей способствует появлению новых установок. Заранее точная модель среды обычно не известна, поэтому выбор установки должен опираться на обобщенную (базовую) модель среды (см. раздел 1.2) и соображения технологического характера.

Потенциал и электрическое поле точечного источника постоянного тока над однородным полупространством определяются формулами:

$$U = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r}, \quad E_x = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot r^2} \cdot \frac{r}{|r|} \quad (17)$$

Из этих формул легко определить истинное сопротив-

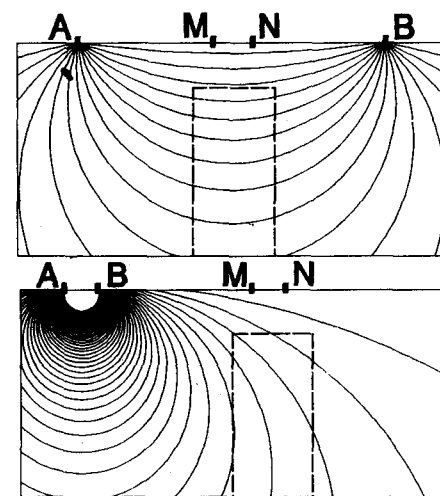


Рис.1.3.3. Сравнение установок СЭП (вверху) и ДОП (внизу)

ление однородного полупространства. Эта величина в случае неоднородных сред получила название кажущегося сопротивления:

$$\rho_k = 2\pi r \cdot \frac{U}{I}, \quad \rho_k = 2\pi r^2 \frac{r}{|r|} \cdot \frac{E_x}{I}. \quad (18)$$

Кажущееся сопротивление в методе сопротивлений рассчитывается по единой для разных установок формуле $\rho_k = K \cdot dU/I$, в которой K , - как видно из сравнения формул (17 и 18), есть величина обратная к величине потенциала или плотности тока в однородном полупространстве (нормального поля). Эту формулу для анализа аномалий удобно преобразовать к виду: $\rho_k = \rho_{MN} \cdot j_{MN} / j_0$, где j_0 - плотность тока в однородном полупространстве, j_{MN} - плотность тока вблизи измерительных электродов в реальной среде, а ρ_{MN} - сопротивление среды в секторе между эквипотенциальными линиями, проходящими через электроды M и N и ограниченном снизу токовой линией для условно максимальной глубины исследования (рис.1.3.4).

Локальные объекты высокого и низкого сопротивления, попадая в сектор между эквипотенциальными линиями M и N , изменяют ρ_{MN} , а заставляя ток обтекать высокоомные объекты и концентрироваться в низкоомных объектах, изменяют j_{MN} . При этом величина MN , как это видно из рис.1.3.4 является фактором относительного управления глубиной. При уменьшении MN сектор между эквипотенциальными линиями M и N становится уже и сравнивая этот сектор с лучом фонарика можно сказать, что становясь более концентрированным он осредняет меньший объем среды и увеличивает относительный вклад удаленных объектов, т.е. светит дальше. При уменьшении MN возрастает геометрический коэффициент установки K . Очевидно, что можно управлять глубиной с помощью разнеса питающих электродов AB в установке Шлюмберже или расстояния между диполями $r=OO'$ в

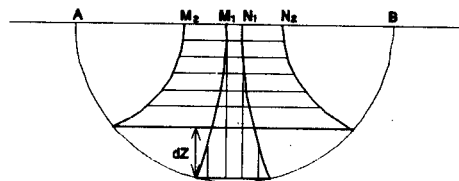


Рис.1.3.4 Эффект управления глубиной с помощью MN

дипольных установках. Рост фактора глубинности здесь также сопровождается ростом K .

В.Х.Фролов (г.Новосибирск, СНИИГГИМС) предложил оригинальные фокусирующие установки для ЭП и зондирования: AMBN [73]. В таких установках при изменении относительного расположения электродов и без изменения общей длины установки ее геометрический коэффициент может возрастать до бесконечности, что свидетельствует о бесконечном росте глубинности. По мнению автора установки, ее главным достоинством является существенное повышение разрешающей способности и геологической эффективности за счет снижения первичного поля при сохранении высокого уровня аномальных сигналов и возможности их регулирования (фокусирования). Не следует конечно упускать из виду, что геометрический коэффициент K - есть обратная величина к геометрическому коэффициенту dU в однородном полупространстве. Поэтому, когда K устремляется к бесконечности, свидетельствуя о бесконечном росте глубинности, dU столь же успешно стремится к нулю, препятствуя легкому достижению большой глубины исследования. Однако в определенных пределах этот путь увеличения глубинности можно использовать.

Среди большого числа установок есть группа установок "чистых аномалий", в которых нормальное поле отсутствует, а сигнал Du вызван наличием неоднородностей. К таким установкам относится MAN, применяемая для выявления крутых контактов пород по линии профиля и установка метода двух контактов пород по линии профиля и установка метода двух составляющих (МДС), предложенная А.Н.Боголюбовым [7]. Большим достоинством последней установки является возможность определять объекты, находящиеся в стороне от профиля. А.Н.Боголюбовым разработана система палеток, или характерных признаков аномалий МДС, позволяющая установить положение объекта, сделать предположения о его форме, размерах, залегании и т.п. Недостатком данной установки является большая сложность аномалий, трудность их классификации и в результате ограниченное использование установки на практике.

Авторы данной книги широко используют в практике зондирований трехэлектродную двухстороннюю (или комбинированную) установку, предложенную А.С.Семеновым. Конечно необходимость организации заземления в "бесконечности" создает немало осложнений, но преимущества при выполнении

зондирований неоднородных сред весьма заметны. Используя аналогию точечного источника и источника света ("фонарика"), можно утверждать что поочередная подсветка объекта то с одной, то с другой стороны, позволяет более наглядно почувствовать его форму. По мнению авторов, большой и до конца не осознанной проблемой электрических зондирований является искажение кривых неоднородностями вблизи питающих электродов (или С-эффект) (см. главу 3). Для выявления и последующего устранения С-эффекта желательное использование установок с одним подвижным питающим электродом. Одновременные искажения от двух перемещаемых питающих электродов в установке Шлюмберже не позволяют разделить эффекты искажений от приповерхностных неоднородностей вблизи питающих электродов от эффектов глубинных частей разреза.

В последние годы во многих странах (Япония, Англия, Италия и др.) очень популярной стала двухэлектродная установка АМ. Она широко используется при изучении археологических объектов, при инженерных изысканиях и для решения экологических задач. Подобная установка часто используется с многоэлектродными измерительными комплексами, где переключение питающих и приемных электродов управляется компьютером (Electrical Imaging или Tomography). Раньше подобные установки мало использовались на практике из-за сильного влияния электромагнитных помех. Современная помехоустойчивая аппаратура сняла эту проблему и сразу на первый план выдвинулась проблема геологических помех, т.е. влияния мелких приповерхностных неоднородностей. Минимально возможное число перемещаемых электродов в установке АМ позволяет легче разобраться с геологическими помехами и после их устранения перейти к изучению глубинных неоднородностей. Термины приповерхностные и глубинные неоднородности здесь используются в том смысле, что первые рассматриваются как помеха на пути рассмотрения более глубоких объектов, а вторые - это именно те, которые нас интересуют. Если в археологии глубинные объекты расположены нередко на глубине 0.5-1 м, то приповерхностные - на еще меньшей. При изучении глубин в 20-40 м, объекты на глубине в 1-2 м являются приповерхностными (и следовательно, помехами). Дополнительными достоинствами двухэлектродной установки АМ является максимальная глубинность,

равноправность обоих перемещаемых электродов (в смысле принципа взаимности). Очевидный недостаток - наличие уже двух линий "бесконечности", что относительно легко преодолевается при детальных малоуглубинных исследованиях. При изучении больших глубин установка АМ неудобна из-за нарастающего влияния помех и наличия двух линий бесконечности. Появление многоканальных автоматизированных аппаратных комплексов для электроразведки (см. раздел 1.5) создает дополнительные благоприятные условия для широкого использования установки АМ.

1.4. О СООТВЕТСТВИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ЛОГНОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В методе сопротивлений широкое применение находят методы обработки, визуализации, интерпретации данных, которые в той или иной степени используют статистические свойства выборок УЭС или кажущегося сопротивления. При использовании статистических методов нередко возникают недоразумения, связанные с недоучетом закона распределения, которому эти данные подчиняются. Большинство формул статистической обработки ориентировано на определенный и, чаще всего, нормальный закон распределения. В подобном случае, если предполагается использование статистических формул, то нужно либо быть уверенным в соответствии данных нормальному закону, или так преобразовать данные, чтобы они стали ему соответствовать, либо определить, какому закону подчиняются данные и так изменить формулы обработки, чтобы они тоже соответствовали этому закону. Подобные вопросы не раз обсуждались в литературе по электроразведке, для которой по мнению многих специалистов характерен логнормальный закон распределения (или нормальный закон для логарифмов параметров) (И.М.Блох, В.Н.Дахнов, В.К.Рыбин, А.П.Савин, Б.Г.Сапожников, В.С.Якупов и др.).

Рассмотрим ряд фактов, свидетельствующих, что для метода сопротивлений характерен логнормальный закон распределения.

1. Основными параметрами в электроразведке являются: свойства пород (удельное электрическое сопротивление - УЭС) и поле (кажущееся сопротивление) - результат измерения ρ_k определенной установкой. Минералы и руды обладают очень широким диапазоном УЭС (от 10^{-5} до 10^{+15} Ом.м). Большин-

ство горных пород являются ионопроводящими и их УЭС определяются количеством и проводимостью влаги, заполняющей поры горных пород. Значения ρ горных пород меняются в более узких пределах: от первых долей до 10^{+6} Ом.м. На небольших участках в конкретных условиях диапазон ρ еще значительно уже и не превышает 2-3 порядков. Во всех этих случаях слева есть точное ограничение - ноль, а граница справа конкретным числом не определена. При переходе к логарифмическому масштабу пределы слева и справа оказываются в равном положении. Положительные значения УЭС и широкие пределы их возможных значений - это признаки логнормального закона.

2. На величину аномалии в электроразведке влияют не абсолютные значения УЭС аномального объекта и вмещающей среды, а лишь их отношения. Этот факт для кусочно-однородных сред можно объяснить исходя из граничных условий $[j_n]=0$, откуда

$$[E_n / \rho] = 0 \text{ или } E_{n1} / E_{n2} = \rho_1 / \rho_2. \quad (19)$$

а в более общем случае - вывести из уравнений для электрического поля и потенциала ([84], ч.1, с.9):

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \vec{E} \cdot \operatorname{grad}(\ln \rho) + q_{\text{ст}} / \epsilon, \quad (20)$$

$$\Delta U = \operatorname{grad}(U \cdot \operatorname{grad}(\ln \rho)) + \rho \cdot \partial q_{\text{ст}} / \partial t. \quad (21)$$

Источники электрического поля в этих уравнениях делятся на две части. К одной относятся сторонние силы $q_{\text{ст}}, \partial q_{\text{ст}} / \partial t$, это внешние или **первичные** источники. Другая часть - **вторичные** источники, зависит от неоднородностей среды - относительных изменений свойств - $(\operatorname{grad} \ln \rho)$ и от электрического поля E . Зависимость аномалий от **относительных** величин контраста свойств - тоже характерный признак логнормального закона.

3. **Мерой точности** измерений в электроразведке является относительная, а не абсолютная погрешность. При использовании логарифмического масштаба относительная ошибка постоянна и независима от абсолютных значений. Логарифмическая шкала позволяет охватить в едином масштабе любой диапазон изменения ρ_k . При этом ошибка считывания одинакова в любой части графика. При изображении

графиков ρ_k в линейном масштабе ошибка считывания гиперболически зависит от величины отсчета, что обесценивает информацию в области минимальных значений. Поэтому при графическом изображении результатов электроразведки для сохранения независимости величины аномалий от абсолютных значений УЭС и равноточности изображения необходим логарифмический масштаб. Такой масштаб - это основа палеток ВЭЗ и ЭП и еще один признак соответствия логнормальному закону.

4. **Экспериментальные проверки закона распределения ρ_k** путем построения гистограмм и графиков накопленных частот на вероятностном бланке показали, что выборки ρ_k подчиняются логнормальному закону тем лучше, чем больше объем выборки N . Для $N=50$ обычно хорошо подходят нормальный и логнормальный законы, но при $N=500$ логнормальный закон однозначно подходит лучше.

Можно ли найти объяснение совпадению электроразведки с логнормальным законом? Основной причиной, как считают статистики является **закон пропорциональности**: величины УЭС и ρ_k зависят от многих факторов, причем каждый из них независим и влияет на результат пропорционально уже достигнутому значению. Это можно показать на примере УЭС. В.Н.Дахнов для зависимости УЭС от различных факторов предложил формулу (2) (см. раздел 1.1), показывающую связь УЭС с параметрами пористости, влажности, содержанием электропроводящих минералов, поверхностной проводимостью (глинистостью), зернистостью, температурой, УЭС поровой

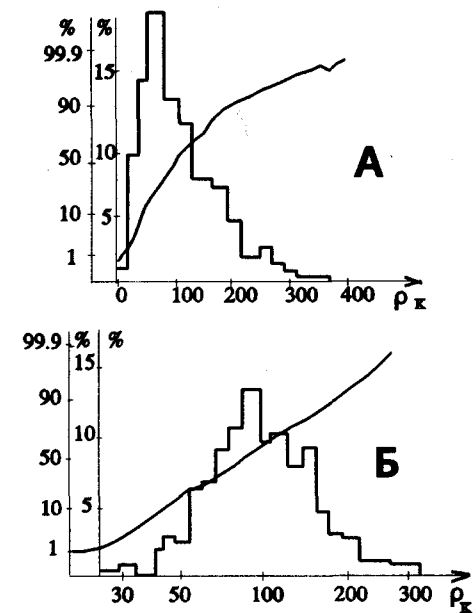


Рис.1.4.1. Гистограммы и ГНЧ для $N(A)$ и $LN(B)$ закона распределения ρ_k

влаги. Все факторы в этой формуле оказываются сомножителями (мультипликативный закон). Сильнее всех на значения УЭС влияют ρ воды и параметр пористости, что отражает формула Арчи: $\rho_n = P_n \cdot \rho_w$. В свою очередь $\rho_w = A/C$, где C - содержание солей в воде, а A - масштабный коэффициент. Содержание солей в воде, как большинство других геохимических закономерностей, подчиняется логнормальному закону. Исследованиями М.В.Раца (1970) установлено, что все параметры трещиноватости хорошо соответствуют этому же закону. Пористость может быть вызвана не только трещиноватостью, но и зернистостью. Многие параметры зернистости, например размеры зерен (Дж. Гриффитс, 1971) тоже логнормальны. Коэффициент проницаемости осадочных горных пород (по У.Крамбейну и Ф.Грейбиллу, 1969) подчиняется логнормальному закону. На этих примерах можно объяснить вторую возможную причину совпадения УЭС и ρ_k с логнормальным законом - благодаря зависимости ρ от логнормально распределенных параметров.

Неучет закона распределения часто приводит к снижению эффективности обработки и интерпретации данных электроразведки или к ошибочным геологическим выводам. На рис.1.4.2 приведены графики ЭП в линейном и логарифмическом масштабе по оси ρ_k из работы В.К.Рыбина и А.П.Савина (О логарифмической форме

представления геофизической информации. В сб. "Расчет и измерение информационных параметров электрометрических полей". Киев, "Наукова Думка", 1967, с.103-117). Для верхнего рисунка предлагается следующая трактовка геологической

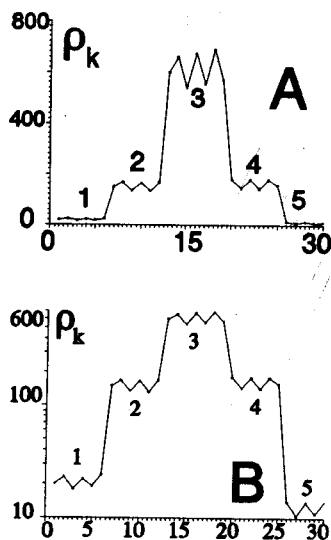


Рис.1.4.2 Графики ЭП в лн. и лог. масштабах по оси ρ_k

Коэффициент проницаемости осадочных горных пород (по У.Крамбейну и Ф.Грейбиллу, 1969) подчиняется логнормальному закону. На этих примерах можно объяснить вторую возможную причину совпадения УЭС и ρ_k с логнормальным законом - благодаря зависимости ρ от логнормально распределенных параметров.

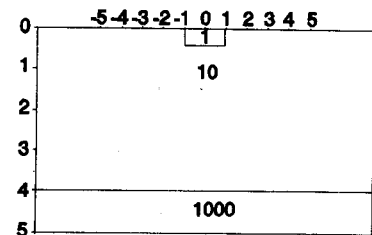


Рис.1.4.3 Модель среды

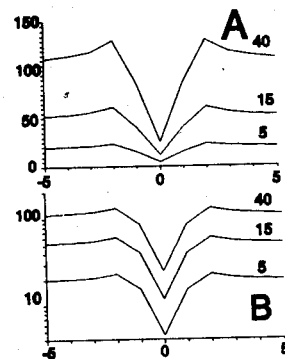


Рис.1.4.4. Графики ЭП для модели с рис.1.4.3

пример электроразведки над моделью двухслойной среды (рис.1.4.3) с приповерхностной неоднородностью, вызывающей сильный Р-эффект (см. главу 3). Графики ЭП в линейном масштабе (рис.1.4.4А) могут привести к заключению о

возрастании амплитуды аномалии с ростом разноса и, следовательно, о глубинном расположении источника аномалии. Графики ЭП в логарифмическом масштабе (4В) показывают, что амплитуда аномалии одинакова для всех разносов. По данным зондирования над этой моделью на разрезе ρ_k (рис.1.4.5) выявляется зона пониженных значений ρ_k во всем интервале разносов. Подобная аномалия нередко объясняется наличием зоны дробления, идущей от поверхности до максимальной глубины исследования, хотя ее действительная причина - тонкая приповерхностная неоднородность. Подобных примеров в практике электроразведки можно отыскать очень много.

Учитывая приведенные факты можно сделать вывод, что подчинение выборок значений истинного и кажущегося сопротивления логнормальному закону является не случайным

ситуации. По ЭП выделяется 5 участков. Первый и пятый имеют одинаковое сопротивление. Дисперсия значений ρ_k для участков 1 и 5 самая низкая, значит это морские осадки. Дисперсия участка 3 самая высокая - это породы совершенно иного происхождения. Изменение же масштаба на логарифмический (рис.В) - показывает, что дисперсия на всех пяти участках сходная, а участки 1 и 5 имеют разное сопротивление. Таким образом выбор масштаба может повлиять на оценку результатов.

На рис. 1.4.3 - 1.4.5 приведен

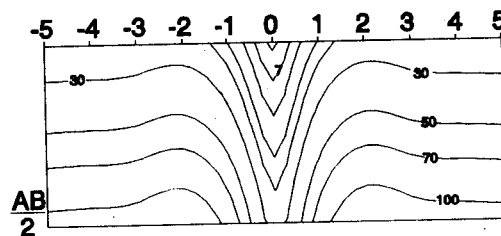


Рис.1.4.5. Разрез ρ_k по ВЭЗ над моделью 1.4.3

явлением, а отражает внутреннюю сущность метода сопротивлений.

Соглашаясь с подобным утверждением следует учитывать логнормальность основных параметров электроразведки на всех этапах работы с этими параметрами.

1. При обработке массовых измерений электрических свойств горных пород для получения оценок средних значений следует использовать **среднее геометрическое**, а не среднее арифметическое. При графическом изображении этих данных в виде гистограмм по оси ρ следует брать **логарифмический масштаб**.

2. При оценке погрешностей следует использовать относительные, а не абсолютные величины. (В настоящее время это общепризнано и отражено в инструкции по электроразведке). Мерой дисперсии надо считать не стандартное отклонение, а **стандартный множитель**.

3. При графическом изображении результатов электроразведки в виде графиков и карт изолиний следует придерживаться **логарифмического масштаба** по оси сопротивлений и сечения изолиний через логарифмически равные интервалы (в геометрической прогрессии). При этом а) достигается постоянство относительной ошибки изображения и считывания независимо от абсолютных значений ρ_k , что соответствует постоянству относительной погрешности съемки; б) в едином масштабе удается охватить любой диапазон изменения ρ_k ; в) достигается равенство амплитуд аномалий для разрезов с одинаковой относительной разницей свойств, но разным уровнем ρ ; г) упрощается сравнение графиков ЭП с теоретическими; д) упрощается учет систематических погрешностей измерений, которые проявляются в этом масштабе в вертикальном сдвиге кривых без изменения их формы; е) благодаря логарифмической шкале появляется возможность графически оценивать случайные и флюктуационные погрешности во всем динамическом диапазоне измерений.

4. При определении фоновых и аномальных значений рекомендуется пользоваться гистограммами и графиками накопленных частот с логарифмическим масштабом по оси ρ_k . При формульных оценках этих параметров - пользоваться средним геометрическим и стандартным множителем. Для снятия фона необходимо вычислять **отношение** наблюдаемых и фоновых значений, а не их разность.

5. При различных преобразованиях данных: осреднении, фильтрации, выделении слабых аномалий и т.д. - для учета логнормального закона удобнее перейти к логарифмам ρ_k .

6. При установлении корреляционных связей между двумя параметрами рекомендуется предварительно оценивать закон распределения. Графическое построение зависимости между параметрами при известной аналитической связи лучше проводить в координатах, линеаризующих эту связь. Для малоизученных параметров следует сначала оценивать закон распределения. Для логнормально распределенных параметров линейную корреляцию следует вычислять между логарифмами параметров.

7. Для совокупностей параметров, подчиняющихся логнормальному закону распределения справедлив мультипликативный закон, переходящий в аддитивный после логарифмирования.

8. Осреднение результатов ЭП следует проводить по формулам среднего геометрического или делать медианные оценки, - независимые от типа распределения и близкие к среднему геометрическому для логнормального закона.

9. При интерпретации данных электроразведки путем сопоставления экспериментальных и теоретических полей ρ_k следует сопоставлять в алгоритме МНК не абсолютные $(\rho_k^{(1)} - \rho_k^{(2)})$, а **относительные** $((\rho_k^{(1)} - \rho_k^{(2)}) / \rho_k^{(ep)})$ разности полей.

Приведенные выше соображения справедливы для метода сопротивлений на постоянном токе, и для представлений данных электроразведки на переменном токе в виде аналогов ρ_k .

1.5. АППАРАТУРА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Аппаратура за время существования метода с начала 20-х годов XX века претерпела большие изменения. Первым комплектом аппаратуры был ЭП-1 [20,75]. Этот прибор, работавший на принципе компенсации, или подавления сигнала в линии MN равным ему по величине, но противоположного знака, включал чувствительный гальванометр для установления момента компенсации. Отсутствие усилителя и низкое входное сопротивление (10 кОм) ограничивали его возможное использование. Появление автокомпенсатора с усилителем ЭСК-1 было началом нового этапа для метода сопротивлений. Очень высокое входное сопротивление (>10 мОм) и хорошая чувствительность (1 мВ) резко расширили

возможности метода, в том числе при неблагоприятных условиях заземления. Но ненадежность электромеханического узла - вибропреобразователя стимулировала дальнейшее развитие проборов для метода сопротивлений. Новым шагом стал измеритель АЭ-72 на транзисторах и микросхемах. Меньше и легче, чем ЭСК, выпускаемый массово, он на многие годы стал стандартной аппаратурой метода. Его недостатками были: большая, чем у ЭСК-1 чувствительность к влаге, иная полярность клемм М и N по сравнению с ЭСК-1 (что вызвало немало недоразумений при истолковании аномалий метода ЕП), наличие ручного компенсатора поляризации. Параллельно с приборами постоянного тока начала развиваться линия приборов с использованием токов низкой частоты (до 25 Гц) - АНЧ-1 и ИКС-50. В попытке преодолеть недостатки АНЧ-1 и ИКС-50, был разработан и после долгих мытарств запущен в серию комплект АНЧ-3 на переменном токе частотой 4.88 Гц. Основными недостатками АНЧ-3 является отсутствие режима постоянного тока в измерителе и фазочувствительного детектора, что исключало возможность его использования для метода ЕП и измерений поля с учетом знака сигнала. Новым поколением стала аппаратура ЭРА, выпускаемая заводом "Геологоразведка" в г. С.-Петербурге. В ней, кроме частоты 4.88 Гц, появились режимы постоянного тока и бесконтактных измерений на частоте 625 Гц. Бесконтактные измерения по методике, разработанной Б.Г.Сапожниковым и другими специалистами НПО "Рудгеофизика", не имеют аналогов в мире. Они позволяют резко повысить производительность работ в условиях затрудненных заземлений, при работе в зимних условиях и т.д. Прибор имеет вместо стрелочного отсчета цифровой, но пока не снабжен электронной памятью и интерфейсным устройством для подключения к компьютеру.

Лучшие образцы аппаратуры для метода сопротивлений других стран отличаются от аппаратуры типа ЭРЫ следующим: наличием встроенных микропроцессоров и памяти, позволяющих контролировать работоспособность всех узлов во время работы, гарантировать точность и помехоустойчивость (если отсчет недостаточно точен, он не появится на табло) и запоминать отсчеты. Результаты измерений из памяти прибора могут быть переданы в компьютер для последующей обработки. В последнее время появились приставки, обеспечивающие

многоканальность измерения и возбуждения поля для работы с многоэлектродными установками. Среди таких новинок можно назвать разработки фирм АВЕМ, ОУО, Schlumberger - Geko-Pracla и др.

Фирма АВЕМ (Швеция) в приставке АВЕМ SAS 4-32 Multimas к известным измерителям Терраметр (аналогичным аппаратуре АНЧ-3 и ЭРА) реализовала возможность выполнения ВЭЗ или ЭП с помощью 4 кос по 32 электрода, подключаемых с помощью двухпроводного кабеля. Переключение электродов осуществляется автоматически по командам, передаваемым на электронные ключи каждого электрода. Все измерения и переключения контролируются полевым компьютером класса Notebook или Laptop. Результаты измерений можно визуализировать немедленно на экране дисплея. Возможно использование большого числа разных установок. Интерпретация электрических зондирований осуществляется по программам известной фирмы Interpex (США), которые могут быть поставлены вместе с аппаратурой.

Фирма Schlumberger - Geko-Pracla разработала комплект аппаратуры для экологических или археологических исследований комплексом методов ЕП и сопротивлений - Respect. Количество измерительных каналов 480. Каждые 16 каналов подключены к отдельному микропроцессору, которые в свою очередь передают данные компьютеру станции. Технология Respect позволяет проводить площадные наблюдения методом ЕП и сопротивлений, причем для последнего при нескольких разносах питающих линий (для достижения разной глубинности) и во взаимно перпендикулярных направлениях пропускания тока. Обработка и визуализация данных в реальном времени, позволяют оперативно анализировать поступающую информацию. Чрезвычайно высокая помехоустойчивость измерений, позволяет вести работы в городах, вблизи промышленных предприятий, то есть именно там, где и нужен экологический контроль.

Фирма ОУО выпустила переносной компьютеризованный комплект для метода сопротивлений, включающий прибор McOHM-21 (Model 2116), переключатель каналов (Model 2207), и электронные переключатели электродов (Model 2516). Этот комплект позволяет использовать до 750 измерительных каналов, автоматически переключать их, контролировать качество измерений, вести цифровую регистрацию всех данных

и их обработку и интерпретацию в полевых условиях. Прибор снабжен 3,5" дисководом и термопринтером, имеет собственный цветной CRT экран для визуализации данных и порт для подключения плоттера. С помощью этого комплекта можно выполнять электрические зондирования, двумерное электропрофилирование с двухэлектродной потенциал-установкой АМ и томографические наблюдения по системе скважина - поверхность или скважина - скважина. Программное обеспечение комплекта обеспечивает автоматическую интерпретацию данных ВЭЗ на IBM совместимом компьютере, обработку, визуализацию и интерпретацию 2D ЭП, в том числе на пересеченном рельефе, обработку и визуализацию электротомографии (на станциях SUN или SPARC).

Аналогичные перечисленным выше многоканальные приставки разработаны многими фирмами: Iris Instruments (Франция) - до 255 электродов, коммутируемых с помощью компьютера; Advanced Geosciences Inc. (США) - 254 электрода, DMT (Германия) - до 960 электродов.

На отделении геофизики геологического факультета МГУ А.А.Мусатов разработал серию электронных контроллеров для геофизических измерений, позволяющих с помощью перепрограммирования использовать их как часть сейсморегистрирующей, каротажной, электроразведочной, магнитовариационной аппаратуры, или для режимной регистрации комплекса геофизических параметров при выполнении мониторинга каких-либо объектов или природных условий. Контроллеры могут работать как автономные и автоматические регистрирующие устройства, подключаться периодически или постоянно к переносным компьютерам класса Notebook для передачи накопленной информации или измерения и обработки в реальном времени. Устройства обладают чрезвычайно высокой помехоустойчивостью. В условиях очень высоких электромагнитных помех, когда не удалось использовать аппаратуру АНЧ-3, АВЕМ и Scintrex для электроразведки методом сопротивлений на объекте в г.Монтеррей (Мексика) контроллер А.А.Мусатова позволил провести измерения ВЭЗ до разносов АВ/2 1500 м с током 40-50 мА и точностью регистрации от 1-3 до 10% в самых неблагоприятных случаях.

Фирмой Phoenix geophysics Ltd. (Канада) разработана 16 канальная аппаратура V5-16, которая может использоваться для регистрации многоканальных наблюдений в методах становле-

ния поля, магнитотеллурических, частотных зондирований, метода сопротивлений (профилирования и зондирования) и сейсморазведки.

Опыт полевых работ в области метода сопротивлений позволяет увидеть большие перспективы в компьютеризованных аппаратурных комплексах. Такие комплексы позволяют выполнять оперативные, помехоустойчивые, многоканальные измерения, гибко изменять методику наблюдений и в ряде случаев менять сами методы (при изменении датчиков полей и устройств для их возбуждения), накапливать измерения в памяти прибора и передавать в компьютер, вести обработку в реальном времени.

В легких геофизических методах становится все более очевидной проблема растущего разрыва производительных геофизических измерений и традиционного топогеодезического обеспечения. Разбивка профилей и пикетов для магнитной съемки или электропрофилирования занимает больше времени и сил, чем собственно магнитные измерения или ЭП. Выходом из этой ситуации может быть использование современных систем ориентации и привязки наблюдений с помощью спутников. Подобные измерения могут быть выполнены как абсолютные (с одним прибором), так и относительные (с двумя приборами). В первом случае точность определения координат на участке в сотни км² составляет 10-20 м, а во втором может достигать первых сантиметров. Конечно применение подобных приборов недешево, но при разумном планировании работ может дать существенный экономический эффект и повышение производительности даже на небольших участках, характерных для инженерной геофизики и экологических исследований.

Глава 2. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТЫХ СРЕД

2.1. ОБЗОР АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ И ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНО - СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Известно, что прямая задача электрического зондирования может быть решена в результате численного расчета интеграла Ханкеля

$$\rho_k(r) = \rho_1 r^2 \int_0^{\infty} R_1(m) m J_1(mr) dm, \quad (1)$$

где r - полуразнос, J_1 - функция Бесселя первого порядка, $R_1(m)$ - называется трансформантой или кернел-функцией и несет информацию о разрезе. Сложности вычисления интеграла (1) обусловлены наличием осциллирующей и слабо затухающей функции J_1 , бесконечными пределами интегрирования и необходимостью расчета интеграла при большом числе различных значений параметра r . При использовании стандартных методов численного интегрирования для достижения приемлемой точности при расчете (1) требуются большие вычислительные затраты, что приводит к значительному расходу машинного времени. В разное время решением этой проблемы занимались Л.Л.Ваньян, Е.Б.Изотова (1968), В.И.-Дмитриев (1969), В.А.Филатов (1979), Ю.А.Дашевский (1982), Е.Ш.Абрамова (1982), А.А.Рыжов (1981), В.А.Шевнин (1992), W.L.Anderson (1979), D.P.Ghosh (1970-1972), Н.К.Johansen (1975) и др. В данном разделе приводится краткое описание некоторых различных подходов.

В.А.Филатов [71] записывает выражение для $R_1(m)$ в виде абсолютно сходящегося ряда, вычисляет его сумму, отбрасывая остаток и допуская при этом ошибку, величину которой можно оценить. В результате, для обеспечения высокой точности расчета кажущегося сопротивления по алгоритму, предложенному В.А.Филатовым, при широких пределах изменения ρ_2/ρ_1 ($10^{-4} + 10^4$) необходимо использовать достаточно большое число членов соответствующих бесконечных рядов, а затем к полученному результату прибавлять поправку, эквивалентную отброшенным членам

ряда.

Ю.А.Дашевский [17] использует преобразование Эйлера для вычисления плохо сходящихся несобственных интегралов от осциллирующих функций. Отрезок числовой оси, в пределах которого вычисляется интеграл, разбивается на интервалы, концами которых являются нули подынтегральной функции. Тогда абсолютные значения интегралов по участкам знакопостоянства подынтегральной функции являются членами знакопеременного ряда, для вычисления которых используются квадратурные формулы. Погрешность при вычислении интеграла практически определяется числом корней осциллирующей функции. Предложенный способ дает высокую точность расчетов ρ_k в том числе больших разносов (r/h 130 тыс.) при высокой контрастности разреза ($10^{-3} < \rho_2/\rho_1 < 10^4$).

А.А.Рыжов [61] предлагает вычислять интеграл (1) как сумму произведений ядра $mR_1(m)$ на коэффициенты D_i , заранее вычисленные для каждого разноса r . Если имеется интеграл

$$I = \int_0^{\infty} f(z) J_1(az) dz, \quad (2)$$

то функцию $f(z)$ можно аппроксимировать набором функций, интегралы от которых представляются в аналитическом виде, т.е. легко вычисляются значения

$$I_n = \int_a^b \varphi_n(z) J_1(az) dz, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Алгоритм численного интегрирования можно записать в виде

$$I = (D, f(z)) = \sum_{i=0}^{N+1} D_i \cdot f(z_i). \quad (4)$$

Значения коэффициентов D_i для каждого разноса r_j вычисляются заранее и хранятся в оперативной памяти ЭВМ. Ядро $f(z)$ несет информацию о разрезе. Точность вычисления интеграла (2) определяется точностью аппроксимации функции $f(z)$.

Наиболее распространенный в настоящее время способ расчета кривых электрических зондирования - метод линейной фильтрации. Первые сообщения о методе появились в печати

в 1967-1973 гг. (D.P. Ghosh, 1971, P.Salat, 1967-1968, W.Anderson, 1973, В.Н.Страхов, 1969), хотя впервые идея была высказана Г.Кунцем (G.Kunetz) в 1966 г. В литературе были опубликованы как способы расчета линейных фильтров, так и сами фильтры (Е.Ш.Абрамова, W.Anderson, D.P. Ghosh, O.Koefoed, H.K.Johansen).

Идея метода линейной фильтрации проста. Исходный интеграл Ханкеля (1) заменой переменных преобразуется в интеграл свертки, который после дискретизации приводится к виду линейного фильтра, формула которого для расчета кажущегося сопротивления имеет вид:

$$\rho_{\kappa}(r_j) = \rho_1 \sum_{k=1}^N R(x_{j-k}) \cdot G_k, \quad (5)$$

где R - кернел-функция, зависящая от параметров разреза и значений абсциссы x ; G - коэффициенты фильтра, число которых N ; r - полуразнос питающих электродов, а j - его индекс. Нам представляется, что на современном этапе именно алгоритм линейной фильтрации является наиболее эффективным аппаратом для вычисления кажущегося сопротивления при решении прямой задачи электрических зондирований в слоистой среде, а также, в силу своей быстроты и точности - для решения обратной задачи.

Существует большое количество алгоритмов решения обратной задачи ВЭЗ. Разные авторы рассматривают различные подходы к интерпретации ВЭЗ на ЭВМ, такие как метод снятия слоев, метод подбора, информационно-статистический подход к обратной задаче ВЭЗ. Область интерпретации результатов электрических зондирований в слоистых средах в настоящее время продолжает активно развиваться, что связано не только с развитием теории, но главным образом, с совершенствованием вычислительной техники, в частности - с появлением и совершенствованием персональных компьютеров.

Широкую известность в электроразведке получили так называемые "прямые" методы интерпретации. Впервые идея такого метода была высказана американским математиком Л.Слихтером в 1933 г., когда он показал, что представление $\rho_{\kappa}(r)$ в виде интеграла Ханкеля (1) обратимо, и по кривой $\rho_{\kappa}(r)$ может быть рассчитана трансформанта $R_1(m)$ проще связанная с параметрами разреза. $R(m)$ допускает после-

довательное определение параметров разреза сверху вниз ("снятие слоев"). Разработкой программ интерпретации ВЭЗ на ЭВМ на основе идеи метода снятия слоев занимались Н.Г.Шкабарня, Б.К.Матвеев, В.П.Колесников (Пермь, ПГУ), В.А.Ряполова (Москва, ЦНИИС), Ю.Д.Ростовщиков (Казань, ВНИИГеолнеруд).

Алгоритм подбора наиболее широко используется в обратных задачах геофизики, в том числе для метода сопротивлений (ВЭЗ). Кроме этого широкое распространение получил автоматизированный подбор в рамках многослойных моделей по способу А.Зохди (трансформация Зохди) [100]. По этому алгоритму в 1991 году группой сотрудников кафедры геофизики геологического факультета МГУ (Симонс Монхе М.И., Колдаев Д.В., Волгин А.В.) составлена программа FAI (Fast Automatic Interpretation - быстрая автоматическая интерпретация).

Еще одним подходом к решению обратной задачи ВЭЗ является информационно-статистический, который разрабатывался в нашей стране главным образом в работах Ф.М.Гольцмана [66], его сотрудников и учеников (Т.Б.Калинина, Л.Н.Порохова [55,91] и др.). Предполагается, что все геофизические наблюдения содержат случайные ошибки (помехи), и поэтому сами оказываются случайными величинами. Статистический подход развивает алгоритмы решения обратной задачи, снижающие влияние случайных ошибок измерений геофизических полей и позволяющие определить возможные ошибки оценки параметров разреза, вызванные наличием ошибок измерений, т.е. оценить эффективность интерпретации.

2.2. ЛИНЕЙНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ

В данном разделе изложен опыт расчета прямой задачи ВЭЗ с помощью метода линейной фильтрации, способ получения самих линейных фильтров с помощью метода наименьших квадратов, идея которого взята из книги О.Куфуда [31]. Рассмотрена система тестирования результатов расчетов.

1. Общие сведения о решении прямой задачи ВЭЗ

Прямая задача ВЭЗ может быть решена в результате численного расчета интеграла Ханкеля [18,19,74] (см. ф-лу 1): где $R_1(m)$ носит название трансформанты или кернел-функции.

В случае трехслойного разреза формула для $R(m)$ имеет вид:

$$R_1(m) = \text{cth} \left\{ mh_1 + \text{arcth} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \times \text{cth} \left[mh_2 + \text{arcth} \left(\frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Расчет $\rho_k(r)$ может быть выполнен путем численного интегрирования формулы (1). Для двухслойных разрезов расчеты легко могут быть проведены с помощью рядов (см. ниже), для многослойных это тоже возможно, но много сложнее. Наиболее распространенный в настоящее время способ расчета - метод линейной фильтрации. В этом случае исходный интеграл Ханкеля путем замены переменных преобразуется к виду интеграла свертки, который, в свою очередь, - к формуле линейного фильтра.

2. Общие сведения о методе линейной фильтрации

Формула линейного фильтра очень проста:

$$\rho_k(r_j) = \rho_1 \sum_{k=1}^{KF} R(X_{k+j-1}) \cdot G(k), \quad (7)$$

где R - кернел-функция, зависящая от параметров разреза и значения абсциссы X ; G - коэффициенты фильтра, число которых равно KF ; r - разнос ($AB/2$), а j - его индекс. В данной формуле значения X возрастают с ростом индекса при них. В литературе часто формула линейного фильтра приводится в несколько ином виде, когда R зависит от m (см. ф-лу 6), $m=1/X$, тогда индекс при m имеет вид $(j-k)$, и коэффициенты G задаются в обратном порядке. Разность j и k подчеркивает происхождение формулы фильтра из интеграла свертки. Но использование X вместо m по нашему мнению удобнее, т.к. проще работать с индексами и, кроме того, с ростом X значения R соответствуют большей глубине исследования, что аналогично поведению ρ_k с ростом r .

3. Параметры линейных фильтров

К основным параметрам линейного фильтра относятся:

1. Число коэффициентов фильтра (или его длина) - KF . Встречаются фильтры с числом коэффициентов от 4 до 200, чаще используются фильтры с KF от 8 до 30.
2. Число точек фильтра, приходящихся на декаду оси аб-

сцисс (на модуль логарифмического бланка) - KTM , и связанная с ним величина коэффициента геометрической прогрессии q :

$$q = 10^{(1/KTM)}. \quad (8)$$

Известны фильтры с KTM от 3 до 10 и даже больше [92], что приводит к значениям q от 2.15 до 1.26. Оптимальными являются значения KTM 6 - 8, что соответствует q от 1.47 до 1.33.

3. Сдвиг α . Это множитель, близкий к единице (или равный ей), характеризующий сдвиг узлов сетки X относительно ближайших узлов сетки r . Для некоторых фильтров он равен 1, т.е. узлы сеток r и X совпадают, для других фильтров отличается от 1 в большую или меньшую сторону. Впервые D.P.Ghosh показал, что правильный выбор α помогает уменьшить число коэффициентов фильтра [31].

4. Положение центрального элемента фильтра, которое определяется указанием либо номера центрального коэффициента, либо числом коэффициентов памяти M , расположенных слева от центра (со стороны меньших X), либо числом коэффициентов предсказания L , расположенных справа от центрального. При этом $M+L+1=KF$. Обычно число коэффициентов памяти M больше числа коэффициентов предсказания L . Это связано с асимметрией входных и выходных функций, что видно из рис. 2.2.2, правда здесь по оси абсцисс отложены m , а не X , поэтому в этих координатах коэффициенты памяти расположены правее, а коэффициенты предсказания - левее центра.

5. Сами коэффициенты фильтра G , желательнее с указанием, в каком порядке они приводятся (по возрастанию m или $X=1/m$).

Принцип линейной фильтрации можно пояснить с помощью (рис. 2.2.1): Верхняя линия рисунка - ось разностей r в логарифмическом масштабе. Ниже ее, также в логарифмическом масштабе, - ось $X=1/m$. При расчете значения ρ_k для одного разноса r требуется рассчитать KF значений кернел-функции R для сетки значений X , возрастающих в геометрической прогрессии с коэффициентом q , определяемым параметром KTM данного фильтра. Ближайшее к данному разносу r значение X соответствует центральному коэффициенту фильтра. Справа от центрального располагаются коэффициенты

предсказания, а слева - коэффициенты памяти. Разница между значениями r и центральным X , называется сдвигом α . ($\alpha = X - r$). Зная число коэффициентов слева от центра (M) можно рассчитать положение первой точки X относительно r по формуле:

$$X_1 = \frac{r \cdot \alpha}{q^M}$$

Легко видеть из рис. 2.2.1, что рассчитывая ρ_k для следующих значений r , возрастающих с тем же множителем q , что и у значений X , мы сможем использовать все значения R (кроме первого), рассчитанные для предыдущего разноса. Если для $\rho_k(r_1)$ требуется KF значений R , то для $\rho_k(r_2)$ потребуется $KF+NR$ значений. Если же сетка разносов произвольная, то для расчета ρ_k на NR разносах потребуется уже $(KF \times NR)$ значений R .

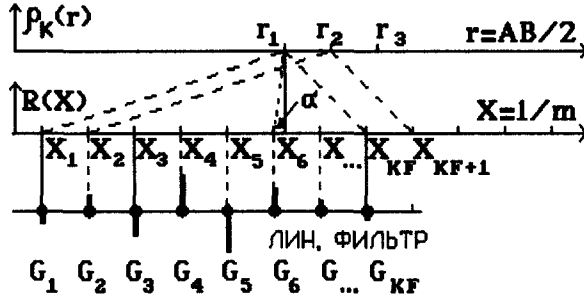


Рис. 2.2.1. Схема алгоритма линейной фильтрации

На третьем (самом нижнем уровне) рис. 2.2.1 схематически изображен набор коэффициентов фильтра. Значения коэффициентов могут быть как положительными, так и отрицательными, причем наибольшие по модулю коэффициенты встречаются в средней части фильтра, а к краям они убывают. Сумма всех коэффициентов фильтра должна быть равна 1, для того, чтобы при пересчете асимптотических (постоянных) значений R в ρ_k , уровень фона не менялся.

4. Основные элементы алгоритма линейной фильтрации

Программа для расчета ρ_k с помощью линейного фильтра должна включать следующие операции:

а) ввод исходных данных о модели (число слоев NS , и удельные сопротивления ρ и мощности h), сведений о разно-

сах (их число NR и первое значение r_1 или весь список разносов, если они произвольные), и значений параметров фильтра (KF, KTM, α, M и G);

б) расчет коэффициента геометрической прогрессии q для сетки X и r по значениям KTM (ф-ла 8);

в) расчет сетки X с шагом KTM точек на декаду, т.е. в геометрической прогрессии с коэффициентом q , начиная с $X_{нач}$, определяемого по формуле (9);

г) расчет сетки r от r начального по формуле геометрической прогрессии с тем же коэффициентом q , если r не заданы списком;

д) расчет значений kernel-функции R или трансформанты $T = \rho_1 R$ по рекуррентной формуле. Обычно используется рекуррентная формула Пекериса [31]:

$$T_N = \rho_N, T_i(X_j) = \frac{T_{i+1} + th\left(\frac{h_i}{X_j}\right) \rho_i}{1 + \frac{T_{i+1} \cdot th\left(\frac{h_i}{X_j}\right)}{\rho_i}}, \quad (10)$$

или Л.Л.Ваньяна:

$$R_N = 1, R_i(X_j) = \frac{1 - F_{i+1}}{1 + F_{i+1}}, \quad \text{где} \quad F_{i+1} = \frac{1 - \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \cdot R_{i+1}}{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \cdot R_{i+1}} \cdot \exp\left(-\frac{2h_i}{X_j}\right), \quad (11)$$

где индексы параметров слоев i меняются снизу вверх по разрезу от $N-1$ до 1;

е) расчет значений ρ_k по формуле (7);

ж) запись результатов.

Подробнее об алгоритме и программах линейной фильтрации можно прочесть в [31,84].

5. Расчет фильтров на основе метода наименьших квадратов

Несмотря на большое количество опубликованных филь-

тров, время от времени возникает потребность в их расчете:

- иногда требуются более точные фильтры,
- требуются фильтры для иной установки,
- требуются фильтры с иными параметрами (KF, КТМ),
- расчет фильтра представляет самостоятельный интерес.

Нами создана программа FILTER, предназначенная для расчета коэффициентов линейных фильтров, преобразующих kernel-функцию R в кажущееся сопротивление ρ_k . Ее прототип взят из книги О.Куфуда [31], программа 5.5.1, стр.74-77.

Идея программы основана на методе наименьших квадратов. Если линейный фильтр G позволяет рассчитать ρ_k по формуле (7), то сам фильтр может быть определен из условия минимума Ф:

$$\Phi = \sum_{j=1}^{NR} \left[\sum_{k=1}^{KF} R(X_{k+j-1}) \cdot G_k - \rho_k(r_j) \right], \quad (12)$$

где ρ_k - известная функция кажущегося сопротивления, а G - неизвестные коэффициенты линейного фильтра.

Условие минимума Ф:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial G} = 0 \quad (13)$$

приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решив которую можно найти G.

Так как получить точную функцию кажущегося сопротивления для подстанции в (12) затруднительно, то вместо функций R и ρ_k можно использовать их специально подобранные аналоги, связь между которыми выражается интегралами Ханкеля, которые имеют аналитическое решение.

Например, для идеальной установки Шлюмберже (S) можно использовать аналоги (полученные с помощью интеграла Вебера-Липшица [31]), если вместо R взять:

$$R^* = m \cdot \exp(-m), \quad (14)$$

а вместо ρ_k функцию:

$$\rho_{kS}^* = \frac{3r^3}{[1+r^2]^{\frac{5}{2}}}, \quad (15)$$

где значения r, начиная с $r_{нач}$ возрастают с тем же шагом q,

что и m (значения m и r в формулах 14-19 безразмерные, см. [31]):

$$r_{нач} = \frac{m_{мин}}{\alpha \cdot q^L}, \quad (16)$$

где L - число коэффициентов предсказания. Это дает возможность рассчитать фильтр для установки Шлюмберже (см. [31], с.82-87).

Меняя выходную функцию ρ_k^* , можно рассчитать фильтр для других установок: Веннера, ДОЗ, для потенциал-установки АМ и для установки зондирования с линейными питающими электродами, соответствующей условиям моделирования на электропроводящей бумаге.

Для установки Веннера (W) аналог ρ_k имеет вид:

$$\rho_{kW}^* = \frac{2r}{[1+r^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{2r}{[1+(2r)^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (17)$$

Приведем еще аналоги ρ_k для ДОЗ (D):

$$\rho_{kD}^* = \frac{3r^3}{[1+r^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{0.5 \cdot (9r^3 - 6r^5)}{[1+r^2]^{\frac{7}{2}}}, \quad (18)$$

для двухэлектродной потенциал-установки АМ (U):

$$\rho_{kU}^* = \frac{r}{[1+r^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (19)$$

и для установки с линейными электродами (L):

$$\rho_{kL}^* = \frac{2r^2}{[1+r^2]^2}. \quad (20)$$

Вид входной и выходных функций для перечисленных установок можно видеть на рис.2.2.2. Ось абсцисс оцифрована значениями m. Для установки осевого дипольного зондирования выходная функция имеет как положительные, так и отрицательные значения. Последние в логарифмическом масштабе изображены по модулю, и для наглядности выделены пунктиром.

В [31] приводятся и другие аналоги функций R и ρ_k .

Работа программой показала, что чисто автоматический режим ее работы весьма неудобен. Поэтому в программе была предусмотрена возможность расчета фильтров в режиме диалога при подборе

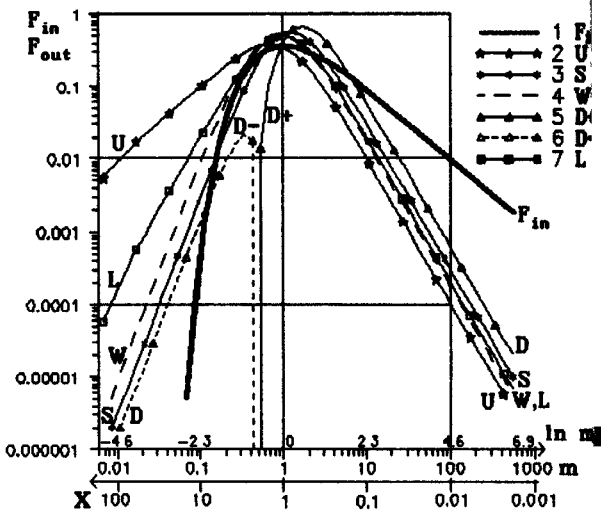


Рис. 2.2.2. Графики входной и выходных функций для расчета фильтров

параметров фильтра по критерию минимальной погрешности расчета ρ_k . В процессе диалога можно менять число коэффициентов фильтра, соотношение коэффициентов предсказания и памяти, сдвиг α , число точек и начальное значение абсциссы входной функции (16). Для оценки погрешности фильтра в программе с помощью рассчитанных коэффициентов фильтра по формуле типа (7) вычисляется выходная функция, сравниваемая с такой же функцией, рассчитанной аналитически по одной из формул (15-20). Относительная среднеквадратичная погрешность по всем разносам является основным внутренним критерием качества фильтра. Другой важный критерий - сумма коэффициентов фильтра. Можно рассчитывать фильтры для установки Шлюмберже, Веннера, ДОЗ, двухэлектродной потенциальной установки АМ и установки с линейными питающими электродами.

6. Работа с программой FILTER

Опыт работы с программой FILTER показал, что минимизация только внутренней погрешности расчета фильтра без учета суммы коэффициентов фильтра, или ориентации только на сумму коэффициентов фильтра (в идеале равную 1), без учета внутренней ошибки недостаточно, и что внутренние оценки в целом недостаточно для получения оптимальных

фильтров. Необходимо еще и внешнее тестирование фильтров путем сопоставления с теоретическими кривыми ВЭЗ, рассчитанными с помощью других фильтров, или других численных методов.

Наиболее практичным является подход, сочетающий расчет фильтров с близкой к минимальной внутренней ошибкой и наиболее близкой к единице суммой коэффициентов при внешнем контроле точности расчета ρ_k , как в областях резких изменений кривых ВЭЗ, так и на асимптотических участках. В последней версии программы внешнее тестирование на эталонах двухслойных кривых ВЭЗ осуществляется той же программой FILTER.

7. Тестирование линейных фильтров

Для тестирования линейных фильтров пришлось разработать систему операций.

1. Расчет линейного фильтра в диалоговом режиме с оптимизацией по внутренним критериям минимума ошибки и близости суммы коэффициентов к 1.

2. Расчет эталонных кривых ВЭЗ с помощью рядов для двухслойного разреза и для любой из 5 установок.

3. Расчет прямой задачи ВЭЗ с использованием полученного фильтра для двухслойной модели и ее сравнение с эталонной кривой с оценкой погрешности на каждом разносе и в среднем по кривой.

4. Накопление вариантов расчетов для выбора оптимальных фильтров.

В процессе работы по расчету и оценке погрешностей прямой задачи пришлось столкнуться с рядом сложностей:

1. Противоречия в теоретических кривых ВЭЗ, опубликованных в виде графиков или таблиц, из-за различий в координатных осях. Так например, на Западе кривые ВЭЗ для установки Веннера принято строить относительно $a=AB/3$, а в нашей стране - $AB/2$, кривые дипольного осевого зондирования (ДОЗ) - относительно r или $r/2$.

2. Ограниченная (и как правило, неконтролируемая) точность многих численных методов и не всегда предсказуемая возможность потери точности.

8. Расчет двухслойных кривых электрического зондирования с помощью рядов

Данный способ расчета широко известен, рабочие формулы могут быть выведены с помощью метода зеркальных

отображений [20,74,84]. Так как этот метод излагается в учебниках по электроразведке, нет нужды в подробном его обсуждении. Приведем только основные формулы для распространенных установок, тем более, что в литературе приводятся в основном формулы для установки Шлюмберже, а для установки ДОЗ к сожалению не удалось найти в литературе формулы без опечаток. Ценность способа расчета через ряды - для тестирования других методов расчета.

Итак, формулы (21) и (22) для потенциал-установки АМ (U):

$$\rho_{kU} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\}, \quad (21)$$

и для идеальной градиентной 4-электродной установки Шлюмберже (S):

$$\rho_{kS} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^3}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}, \quad (22)$$

для установки Веннера (W):

$$\rho_{kW} = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K_{12}^n \cdot a \left(\frac{1}{[a^2 + (2nh_1)^2]^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{[(2a)^2 + (2nh_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \right) \right\}, \quad (23)$$

для установки дипольного осевого зондирования (ДОЗ) (формула получена А.Г.Яковлевым) (D):

$$\rho_{kD} = \rho_1 \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^3 [2r^2 - (2nh_1)^2]}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{\frac{5}{2}}} \right\}; \quad (24)$$

для установки с линейными электродами (аналог моделирования на электропроводящей бумаге над горизонтально-

слоистой средой) (L):

$$\rho_{kL} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{12}^n \cdot r^2}{r^2 + (2nh_1)^2} \right\}. \quad (25)$$

При практической реализации расчетов по этим формулам важен выбор максимального числа членов ряда и условий контроля сходимости. В качестве условия сходимости удобно брать отношение модуля n-го члена ряда dS к накопленной сумме S членов ряда. Если модуль отношения dS / S < ε, то суммирование можно закончить. Количество членов ряда, достаточное для достижения условия сходимости зависит от разности (и растет с ростом r) и зависит от контраста сопротивлений (с его ростом сходимость ухудшается). Наш опыт показал, что желательно проводить расчеты с двойной точностью и число членов ряда для достижения точности в 5 знаков составляет от нескольких сотен до десятков тысяч. Естественно, что время счета прямой задачи с помощью рядов заметно больше, чем в методе линейной фильтрации.

9. Результаты тестирования

При отладке фильтров и программ для решения прямых задач ВЭЗ использовались два способа контроля правильности решения: графический и цифровой. Графический способ полезен для экспрессного, но грубого контроля, когда различия значений ρ_k превышают 20%. Для более точного контроля необходимо сопоставление результатов в цифровой форме.

Для тестирования нужно было выбрать модели разрезов и систему разностей. Мы использовали сетку разностей: 0.5 - 1024 м с коэффициентом прогрессии 2, предложенную В.А.Филатовым [71]. В качестве эталонов использовались двухслойные кривые ВЭЗ.

При перекрестной проверке фильтров и других алгоритмов расчета для установки Шлюмберже на модели В.А.Филатова с ρ: 1-10000, h: 1, установлено, что за исключением 9-точечного фильтра Гоша, дающего погрешность до 7%, для остальных фильтров она не превышала 1%. Т.е. "восходящие" кривые ВЭЗ - достаточно простой объект для расчета.

Напротив, модель с ρ: 1-0.0001, h: 1 выявила погрешности счета разных фильтров от 8 до 2000%, поэтому с ее помощью оказалось удобно проводить их сопоставление. На рис. 2.2.3 и в таблице 1 показаны результаты этих расчетов. На

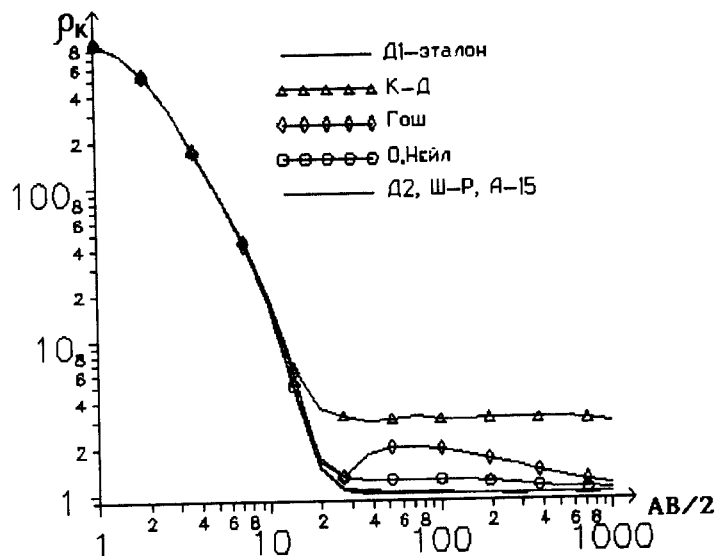


Рис.2.2.3. Сравнение кривых ВЭЗ типа Q для расчетов с разными фильтрами

рисунке визуально не отличаются результаты программ Дашевского Д-1 и Д-2 [17], расчеты авторов (МГУ [58,79,84]) и Абрамовой (А-15[1]). Их отличия выявляются только в таблице. Очень заметно отличаются в области спада и правой асимптоты кривые для фильтров Куфуда и Диркса (К-Д), Гоша и О.Нейла [31].

В таблице 1 за эталон приняты расчеты В.А.Филатова. Для компактности таблицы значения ρ_k приведены лишь для программы эталона, а для других программ даны относительные погрешности на каждом разносе в %. Таблица упорядочена по уменьшению погрешностей счета от худших к лучшим алгоритмам. Обозначения: К-Д - фильтр Куфуда и Диркса, Г - 9-точечный фильтр Гоша, Н - фильтр О.Нейла, Д-2 - программа Дашевского для MN конечной длины, МГУ - фильтр, полученный авторами по программе FILTER с двойной точностью, А-15 - 15-точечный фильтр Абрамовой, Р-Я - программа из [58], Д-1 - программа Дашевского для идеальной установки Шлюмберже.

Интересно отметить, что расчет по программе Р-Я [58] точнее, чем А-15 [1], хотя использует тот же фильтр. Это достигается прежде всего интегрированием поля в пределах MN. Фильтр Куфуда и Диркса [31] рассчитан также с помощью метода наименьших квадратов, что и фильтр МГУ, но значительно уступает последнему по точности. Фильтр Гоша один из самых первых в мире, он был опубликован в 1971 г., и тогда же автор предупредил о его низкой точности в условиях, когда перепад значений ρ_k превышает 25.

Таблица 1

СОПОСТАВЛЕНИЕ КРИВЫХ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ШЛЮМБЕРЖЕ
МОДЕЛЬ: СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЕВ 1.00 0.0001; МОЩНОСТЬ 1.00

AV/2	ρ_k -эталон	К-Д (%)	Г (%)	Н (%)	Д-2 (%)	МГУ (%)	А-15 (%)	Р-Я (%)	Д-1 (%)
0.5	.974468	.201	-.242	.014	-.005	.002	.008	.003	-.009
1.0	.843345	.252	.267	.022	.065	.002	.010	.007	.052
2.0	.427556	.396	-.556	.043	.595	.006	.020	.057	.052
4.0	.049736	4.130	4.250	.370	.788	.097	.149	-.072	-.052
8.0	.000361	620.222	13.573	57.895	7.147	6.648	10.803	-2.216	-.277
16.0	.000101	1969.307	800.990	216.832	26.238	-5.941	18.812	-7.921	.139
32.0	.000100	1990.000	440.000	240.000	13.300	22.000	20.000	2.000	.000
64.0	.000100	2150.000	1160.000	240.000	6.600	25.000	10.000	-1.000	.000
128.0	.000100	2050.000	860.000	230.000	3.300	15.000	.000	-1.000	.000
256.0	.000100	2110.000	470.000	170.000	1.600	8.000	.000	-1.000	.000
512.0	.000100	2100.000	240.000	90.000	.800	4.000	.000	.000	.000
1024.0	.000100	1770.000	120.000	50.000	.400	2.000	.000	.000	.000

Аналогично были проведены расчеты для установки Веннера, ДОЗ, двухэлектродной потенциал-установки АМ и установки с линейными электродами. Результаты опубликованы в [79].

В наиболее краткой форме результаты проверки приведены в табл. 2, где для трех степеней контраста сопротивлений (2, 3 и 4 порядка) приведены средние по всем разносам и максимальные погрешности. Сравнивая показатели таблиц 1 и 2 можно видеть, что качество фильтров, рассчитываемых по нашей методике весьма высокое и новые фильтры можно смело рекомендовать для широкого практического использования. Резко выделяются в табл.2 лишь погрешности для потенциал-установки АМ для малых разносов при $\rho_2=10000$.

Таблица 2

ОБОБЩЕННЫЕ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ФИЛЬТРОВ (S,W,D,L,U)

Установка	KF	ПОГРЕШНОСТЬ ВНЕШНЯЯ							
		ρ_2	0.01	0.001	0.0001	100	1000	10000	
N Фильтра			МОДЕЛЬ: $\rho_1=1.0, H_1=1.0, \rho_2 - \text{VAR}$						
S-16	15	Ср.	0.024	0.246	2.45	0.03	0.056	0.074	
		Макс.	0.06	0.65	6.8	0.061	0.094	0.1	
W-14	15	Ср.	0.007	0.043	0.375	0.044	0.080	0.105	
		Макс.	0.02	0.09	0.76	0.086	0.130	0.14	
D-16	20	Ср.	0.007	0.125	0.617	0.022	0.039	0.109	
		Макс.	0.01	0.68	1.135	0.046	0.068	0.158	
L-7	20	Ср.	0.023	0.168	1.681	0.029	0.121	0.216	
		Макс.	0.055	0.368	3.862	0.076	0.248	0.35	
U-14	25	Ср.	0.04	0.06	0.5	0.653	4.022	12.5	
		Макс.	0.06	0.16	1.3	1.794	10.849	27.0	

10. Сравнение кривых ВЭЗ для разных установок

На рис. 2.2.4-6 показаны кривые электрического зондирования для перечисленных 5 установок для двухслойной модели (ρ : 1000-1 и h : 1 м.), трехслойных разрезов типа Н (ρ : 1-0.002-1, h : 1-20 м.) и К (ρ : 1-200-1, h : 1-5 м.). Кривые для 5 установок расположились по оси разносов слева направо в следующем порядке: потенциал - установка (U), установка с линейными электродами (L), Шлюмберже (S), Веннера (W) и дипольная осевая (D) в соответствии с уменьшением глубинности. Особенно заметно преимущество в глубинности U по сравнению с другими установками, иногда на порядок, на восходящих ветвях кривых ВЭЗ. Таким образом получается, что максимальной глубинностью обладает потенциал - установка. Но практически это ее преимущество скорее всего иллюзорно, так как в полевых условиях она требует размещения двух линий бесконечности для В и N электродов, и обладает мень-

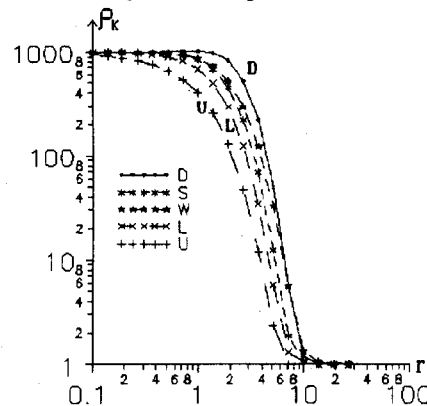


Рис.2.2.4. Кривые ВЭЗ над 2-слойной моделью для 5 установок

шей помехоустойчивостью. По крутизне перегиба от левой горизонтальной асимптоты к восходящей или нисходящей части кривой, которая определяет точность оценки глубин (т.е. разрешающую способность) на первом месте оказывается дипольная, а на последнем потенциал - установка.

Кривые для установки Веннера (W) сдвинуты относительно Шлюмберже (S) вправо к большим разносам в соответствии с известным правилом: увеличение MN приводит к уменьшению глубинности. Глубина минимума кривых типа Н и степень приближения $\rho_{\text{мин}}$ к ρ_2 возрастают от U к D. Для оценки ρ проводящего слоя методом характерных точек это безусловно имеет значение, но для 5 установок для компьютерных способов интерпретации - несущественно.

В заключение приводим примеры фильтров для 5 установок (Шлюмберже, Веннера, ДОЗ, двухэлектродной потенциал-установки АМ и установки с линейными электродами), рассчитанных по программе FILTER:

Таблица 3
Фильтры для различных установок электрического зондирования

1. Установка Шлюмберже (S-16): KF=15, KTM=7, ALFA=1.005, M=9
 G /-0.015821, 0.203596, -1.222006, 3.856356, -5.567616, 2.414293, -0.758876, 2.122195, -0.671525, 0.783732, -0.290884, 0.169452, -0.031227, 0.003612, 0.004705/
 Среднеквадратичная ошибка (в %)= 0.00104840 %
 Сумма коэффициентов фильтра= 0.99998610

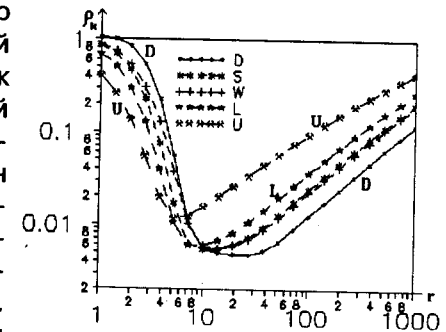


Рис. 2.2.5. Кривые ВЭЗ типа Н для 5 установок

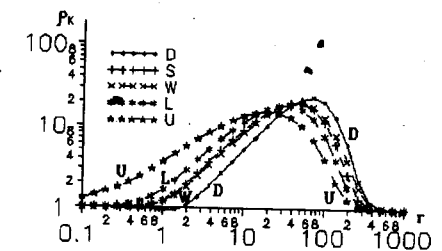


Рис. 2.2.6. Кривые ВЭЗ типа К для 5 установок

2. **Установка Веннера (W-14):** KF=15, KTM=7, ALFA=1.14, M=9
 G /-0.0060761, 0.0776724, -0.4517604, 1.2470370, -0.9712197,
 -1.1451320, 0.4341175, 0.7623470, 0.7153097, 0.0463033,
 0.3228741, -0.1333170, 0.1333268, -0.0497029, 0.0181955/
 Среднеквадратичная ошибка (в %)= 0.00079071 %
 Сумма коэффициентов фильтра= 0.99997470

3. **Установка ДОЗ (D-16):** KF=20, KTM=7, ALFA=1.135, M=14
 G /-0.0000130, 0.0022634, -0.0213047, 0.1154131, -0.4859322,
 1.7711440, -5.4590220, 12.2481200, -15.5475300, 6.9440900,
 0.3930209, 1.7350750, -0.8505089, 0.3898381, -0.2843019,
 0.0915451, -0.0438194, 0.0022785, 0.0017841, -0.0021373/
 Среднеквадратичная ошибка (в %)= 0.00075535 %
 Сумма коэффициентов фильтра= 1.00000800

4. **Потенциал-установка АМ (U-14):** KF=25, KTM=7,
 ALFA=1.75, M=9
 G /0.021050, -0.227701, 0.930814, -1.523978, 1.010370,
 -1.427002, 2.077722, -1.872570, 2.660787, -2.567381, 3.158133,
 -3.199600, 3.597916, -3.667092, 3.881488, -3.868526, 3.862603,
 -3.656208, 3.360556, -2.868746, 2.263495, -1.553329, 0.883808,
 -0.361660, 0.084523/
 Среднеквадратичная ошибка (в %)= 0.00587683 %
 Сумма коэффициентов фильтра= 0.99947610

5. **Установка с линейными электродами (L-7):** KF=20,
 KTM=7, ALFA=1.1415, M=8
 G /0.053496, -0.548818, 2.188049, -3.575252, 1.976495,
 -1.514297, 2.494498, -1.378438, 1.746731, -1.155709, 1.093076,
 -0.752920, 0.585868, -0.368543, 0.229502, -0.110088, 0.043526,
 -0.007170, -0.001801, 0.001788/
 Среднеквадратичная ошибка (в %)= 0.00114470 %
 Сумма коэффициентов фильтра= 0.99999450

ВЫВОДЫ

1. Создана программа расчета линейных фильтров для 5 установок электрического зондирования, позволяющая в режиме диалога с оптимизацией по внутренней погрешности

фильтра и сумме коэффициентов фильтра получать фильтры достаточно высокой точности.

2. Установлено, что для получения хороших фильтров одного внутреннего тестирования недостаточно и нужно еще внешнее тестирование: расчет реальных кривых зондирования и их сопоставление с эталонными кривыми.

3. Разработанный механизм расчета фильтра с нужными характеристиками позволяет создавать программы прямых и обратных задач со сменными фильтрами.

2.3. ПРЯМАЯ ЗАДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-СЛОИСТОГО РАЗРЕЗА ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Современным подходом к решению прямой задачи электрических зондирований является метод линейной фильтрации. Для ряда установок Шлюмберже, Веннера, осевой и экваториальной дипольных, для потенциал-установки известен целый ряд линейных фильтров. В то же время, нередко возникает потребность решения прямой задачи электроразведки постоянным током для других типов установок. Кроме того, реальные установки могут существенно отличаться от теоретических. Так, вместо идеальной установки Шлюмберже на практике применяется четырехэлектродная симметричная установка с конечными MN, а при работе с трехэлектродными установками второй питающий электрод часто относится недостаточно далеко, чтобы можно было пренебречь его влиянием. В связи с этим необходим алгоритм, позволяющий рассчитывать кажущееся сопротивление на поверхности горизонтально-слоистой среды для произвольной четырехэлектродной установки.

Предлагаемый алгоритм решения прямой задачи зондирования для произвольной установки [58] основан на том, что разность потенциалов между приемными электродами получается путем интегрирования напряженности электрического поля. Разность потенциалов ΔU_{MN} представляется в виде:

$$\Delta U_{MN} = \Delta U_{MN}^A - \Delta U_{MN}^B,$$

$$\text{где } \Delta U_{MN}^A = U(r_{AM}) - U(r_{AN}) = \int_{r_{AN}}^{r_{AM}} E(r) dr, \quad (26)$$

$$\Delta U_{MN}^B = U(r_{BM}) - U(r_{BN}) = \int_{r_{BN}}^{r_{BM}} E(r) dr,$$

а $E(r)$ - напряженность электрического поля точечного источника, расположенного на поверхности горизонтально-слоистого разреза.

Для вычисления электрического поля во всем диапазоне разносов, характеризующих данную электроразведочную установку, используется прямая задача для установки Шлюмберже:

$$E(r) = \frac{\rho_k(r)}{2\pi r^2}, \quad (27)$$

где $\rho_k(r)$ - кривая ВЭЗ над данным геоэлектрическим разрезом, рассчитанная методом линейной фильтрации. По полученным значениям $\rho_k(r_i)$ проводится кубический сплайн. Далее производится интегрирование функции $E(r)$, для чего на каждом интервале $[r_i, r_{i+1}]$ разносов, изменяющихся с геометрическим шагом, характерным для данного фильтра, вычисляется первообразная $F_i(r) = \int E(r) dr$. На заключительном этапе происходит интегрирование в конечных пределах, согласно (1).

Настоящий алгоритм реализован в виде программы DVESU на языке Паскаль на персональном компьютере IBM PC. Программа позволяет решать прямую задачу для произвольно расположенных питающих и приемных электродов. Она может быть использована:

- для решения прямой задачи электрического зондирования с высокой точностью для разрезов с большими перепадами сопротивлений (до 10^4);
- для произвольных установок (положение электродов А, В, М, N на плоскости наблюдений произвольно);
- для таких "обычных" установок, как Шлюмберже, Вен-

нера, дипольной, при этом сетка разносов может быть любой, например, арифметической (в отличие от стандартных разносов для метода линейной фильтрации, меняющихся в геометрической прогрессии);

- для расчета "реальных" кривых ВЭЗ: состоящих из сегментов для разных линий MN, трехэлектродных AMN с заметным влиянием недостаточно далеко отнесенного электрода В и т.д.;

- для решения обратных задач электрического зондирования с произвольными установками.

2.4. РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ

Программы интерпретации кривых ВЭЗ на ЭВМ разрабатываются уже более 30 лет [26, 31, 34, 47-48, 55, 61, 67-68, 76, 83, 84, 86, 91, 96-100]. Придумать что-то принципиально новое в этой области очень сложно, но поиск оптимального алгоритма остается актуальным.

Среди методов решения обратной задачи ВЭЗ наибольшее распространение получили алгоритмы подбора. В них осуществляется лишь уточнение некоторого начального приближения, а не поиск решения в полном смысле этого слова. Методом последовательных приближений находят поправки в параметры модели, минимизируя некоторый функционал невязки. Чаще всего используют среднеквадратическое отклонение

$$FC^*(p) = \sum_{j=1}^{NR} \left(1 - \frac{\rho_{k_j}^t}{\rho_{k_j}^{obs}} \right)^2 \quad (28)$$

или логарифмическую невязку

$$FC(p) = \sum_{j=1}^{NR} (\ln \rho_{k_j}^{obs} - \ln \rho_{k_j}^t)^2, \quad (29)$$

где ρ_k^t и ρ_k^{obs} - теоретические и наблюдаемые значения ρ_k для j -ого разноса; $P = \{\ln \rho_j, \ln h_j\}$ - вектор логарифмов параметров разреза; NR - число разносов на кривой зондирования.

При малых невязках оба этих функционала совпадают.

Это следует из известного предела:

$$\lim_{x \rightarrow 1} (\ln x) = x - 1. \quad (30)$$

Для расчета поправок применяются различные алгоритмы оптимизации. Наиболее распространенными являются два подхода - различные модификации метода наискорейшего спуска и метод Ньютона. При первом подходе мы линеаризируем функционал невязки (см. рис. 2.4.1).

Это делает алгоритм очень устойчивым, вследствие малых изменений параметров модели. Однако он медленно сходится при малых значениях невязки, т.к. в этой области не выполняется предположение о его линейности (см. рис.2.4.1).

Кроме того, при таком подходе большой проблемой являются локальные минимумы и седловые точки, т.е. точки, в которых все первые производные равны нулю, но не являющиеся точками минимума (см. рис.2.4.2).

Таким образом, при неудачном начальном приближении алгоритм может остановиться далеко от действительного решения (см. рис.2.4.3). В этом случае нужно вручную изменить модель и пустить автоматический подбор с новым начальным приближением. Вышеизложенное делает затруднительным использование метода наискорейшего спуска в программах автоматической интерпретации.

Идея метода Ньютона заключается в том что, в окрестности текущего приближения P_0 прямая задача ВЭЗ заменяется вспомогательной линейной функцией: где NP - число подбираемых параметров; ΔP - поправка в пара-

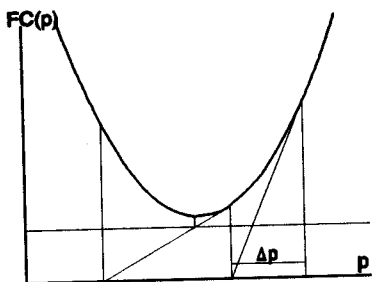


Рис.2.4.1. Идея метода наискорейшего спуска

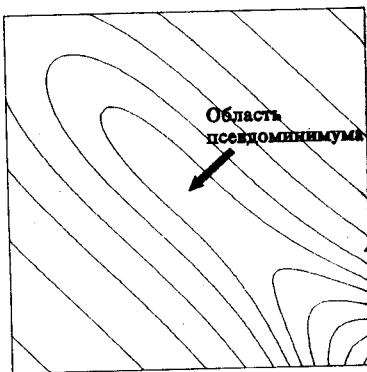


Рис.2.4.2. Пример локального псевдоминимума для функции двух переменных

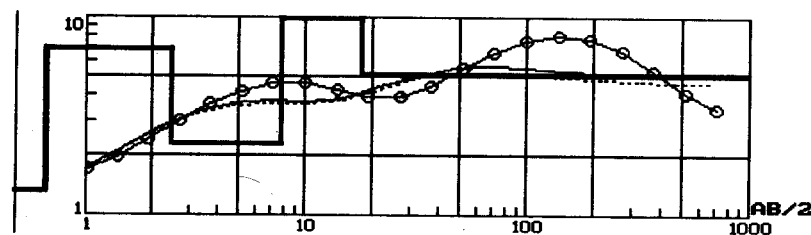


Рис.2.4.3. Пример остановки подбора в локальном минимуме

$$\begin{aligned} \ln \rho_{k_i}^t(\rho_0 + \Delta \rho) \approx \\ \ln \rho_{k_i}^t(\rho_0) + \sum_{i=1}^{NP} \Delta \rho_i \frac{\partial \ln \rho_{k_i}^t}{\partial \rho_i}, \end{aligned} \quad (31)$$

метр.

Рассмотрим функционал логарифмической невязки (см. формулу 29). Условие минимума функционала $FC(p)$ - равенство нулю частных производных по всем параметрам:

$$\frac{\partial FC}{\partial \rho_m} = 0, \quad m=1 \dots NP. \quad (32)$$

Подставим функцию (31) в уравнение (29). Из условия (32) мы получим систему из NP линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{NR} (\ln \rho_{k_j}^{obs} - \ln \rho_{k_j}^t(\rho_0)) \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial \rho_m} - \\ - \sum_{j=1}^{NR} \sum_{i=1}^{NP} \Delta \rho_i \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial \rho_i} \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial \rho_m} = 0, \\ m = 1 \dots NP. \end{aligned} \quad (33)$$

Эту систему уравнений можно переписать в матричном виде:

$$F^T F \Delta \rho = F^T (\ln \bar{\rho}_k^{obs} - \ln \bar{\rho}_k^t), \quad (34)$$

где F - матрица частных производных ρ_k размером NP на NR :

$$F_{ij} = \frac{\partial \ln p_{k_i}^t}{\partial p_i}; \quad (35)$$

$$j=1 \dots NR, \quad i=1 \dots NP.$$

Введя обозначения $F^T F = A$ и $F^T \Delta p_k = b$, получим:

$$A x = b. \quad (36)$$

Чтобы найти поправки в параметры, достаточно решить эту систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Но при этом возникают две проблемы, которые нужно рассмотреть более подробно.

Во-первых, нередко $\det A$ близок к нулю и вычисление обратной матрицы становится невозможным. Существуют различные способы преодоления проблемы инверсии матрицы. Наиболее распространены метод Маркуардта и метод псевдообращения или сингулярного разложения. Исходная матрица немного изменяется специальным образом, чтобы стало возможным ее обращение. И уже для новой матрицы ищется решение.

Во-вторых, сама линеаризация прямой задачи ВЭЗ (формула 31) правомерна только в ограниченной окрестности начального приближения. При плохом выборе начального приближения метод Ньютона дает слишком большие изменения параметров, и алгоритм расходится. Некоторые специалисты рекомендуют сначала использовать метод наискорейшего спуска, а затем для уточнения решения метод Ньютона. В этом случае возникает проблема когда и как перейти от одного алгоритма к другому.

А.А.Бобачев предложил решать систему уравнений итерационным методом Зейделя. Такой подход позволяет достаточно просто преодолеть выше изложенные проблемы.

Идея этого метода показана на рис. 2.4.4. В качестве начального приближения к решению СЛАУ (36) логично использовать нуле-

$$A \cdot x = b \quad Ax = b$$

$$B \cdot x^i = b - C \cdot x^{i-1} \quad Ax = Bx + Cx^{i-1}$$

$$Bx^i = b - Cx^{i-1} \quad A = B + C$$

Рис.2.4.4 Идея решения СЛАУ методом Зейделя

вой вектор, т.к. из множества решений мы ищем решение достаточно близкое к начальной модели.

Доказано [11], что для симметричной и положительно определенной матрицы (матрица A именно такая, см. формулу 34) метод Зейделя сходится.

Причем, как показывает практика, сходится очень быстро (для получения приемлемого решения обычно достаточно всего пяти итераций). Таким образом при использовании итерационного метода решения СЛАУ снимается проблема инверсии матрицы.

Чтобы исключить возможность получения слишком больших поправок, в алгоритм Зейделя нужно добавить проверку на выход получаемого решения за границы области линейности наискорейшего спуска и метода Ньютона. Причем для Ньютона. разных параметров эти ограничения могут быть различными, т.к. очевидно, что область линейности для сопротивлений слоев значительно шире, чем для мощностей. Введя правильные ограничения, мы как бы подталкиваем алгоритм к изменению, главным образом, сопротивлений. Позднее можно выбрать из области эквивалентности нужное решение.

В результате был получен алгоритм, который объединил в себе достоинства обоих методов решения обратной задачи:

- 1) широкая область сходимости (в качестве начального приближения достаточно указать число слоев и примерные мощности);
- 2) заметно более высокая скорость сходимости, чем у метода наискорейшего спуска.

На рис.2.4.5. сопоставляется скорость сходимости метода Ньютона и наискорейшего спуска для трехслойной модели. Такое соотношение между двумя методами является типичным.

На рис. 2.4.6 показано достаточно плохое начальное при-

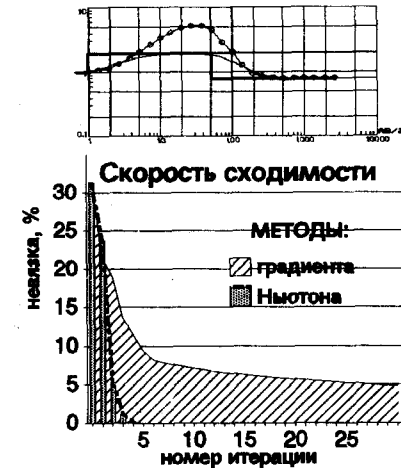


Рис.2.4.5. Сравнение сходимости границы области линейности наискорейшего спуска и метода Ньютона.

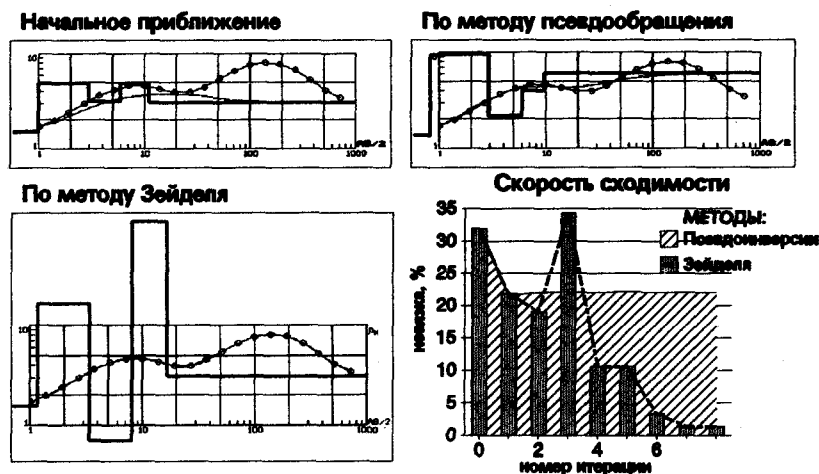


Рис.2.4.6 Пример подбора при плохом начальном приближении

ближение - все мощности сильно занижены. Но использование метода Зейделя позволяет подобрать модель даже из такого плохого начального приближения. Необходимо обратить внимание на то, что на четвертой итерации невязка резко возросла. Большинство авторов различных алгоритмов минимизации указывают, что это является признаком расхождения алгоритма. Однако из графика сходимости предложенного метода видно, что на самом деле он все-таки сходится. Метод Зейделя используется для автоматической минимизации невязки в алгоритме подбора программы IPI (с 5-й версии), входящей в состав пакета одномерной обработки и интерпретации данных ВЭЗ IPI-1D [40,84].

Пакет IPI с 1990 г. прошел большую проверку на практических материалах ВЭЗ по многим регионам. Это позволило значительно усовершенствовать процесс 1D интерпретации. Основная концепция пакета IPI-1D - профильная (групповая) интерпретация ВЭЗ. Вплоть до 6 версии программа IPI работает с двумя графическими экранами: на одном изображаются разрез кажущихся сопротивлений и геоэлектрический (по результатам интерпретации), а на другом - интерпретируемая кривая ВЭЗ. Быстрый переход от кривой ВЭЗ к разрезам по профилю (до 100 кривых ВЭЗ на одном профиле) и обратно, позволяет увидеть, как результат интер-

претации конкретной кривой вписывается в общую модель разреза по профилю, и скорректировать модель для этой кривой ВЭЗ. Профильная интерпретация позволяет получать геоэлектрические разрезы наиболее полно отвечающие геологическим требованиям и априорным данным (по критериям гладкости границ, устойчивости электрических свойств, мощностей отдельных слоев, данным буровых скважин и т.д.). По мере развития пакета программ IPI-1D, продолжал совершенствоваться аппарат для автоматической интерпретации кривых ВЭЗ, один из этапов такого развития приведен в настоящем разделе. Но чем больше и точнее объем геологической априорной геологической информации о разрезе, тем меньшую помощь мог получить интерпретатор от алгоритма автоматической минимизации, тем в большей степени интерпретация становилась ручной (неавтоматической) и зависела от геологической квалификации интерпретатора. Поэтому в новой версии программы IPI основное внимание обращено на средства работы с программой, позволяющие облегчить процесс именно геологической интерпретации. Для этого интерпретируемая кривая ВЭЗ, модель среды для этой кривой и весь разрез или его часть помещаются на одном экране. Интерпретатор может менять рамки окна просмотра разреза, помещая в него часть профиля, непосредственно примыкающую к интерпретируемой кривой, или весь разрез, видеть его с учетом рельефа дневной поверхности, менять горизонтальный и вертикальный масштабы.

Собственно автоматическая интерпретация как минимизация невязки теоретической и экспериментальной кривой остается составной частью пакета интерпретации, и на отдельных этапах работы может использоваться для некоторой оптимизации решения, но не является главным средством получения решения. Минимум невязки лишь один из критериев решения, но не единственный. Аспирантом кафедры геофизики Н.В.Мыщиком в 70-х годах для ЭВМ БЭСМ-6 была разработана программа MIDI (максимального использования дополнительной информации). В алгоритм автоматической минимизации вносилось множество условий: на пределы сопротивлений и мощностей, допустимую изменчивость параметров по профилю, в том числе не только ρ и h , но и S и T слоев и их групп. Опыт работы с программой показал очень высокую трудоемкость задания до начала интерпретации

всех этих условий и ограничений. Многие условия формируются собственно в процессе интерпретации. Современный персональный компьютер, обладающий высокой скоростью счета и высоким качеством графического отображения данных позволяет человеку активно проводить интерпретацию с использованием большого числа различных критериев, часть которых формируется в процессе интерпретации, а в качестве исходных данных используются лишь результаты измерений (кривые ВЭЗ). Попытка передоверить компьютеру весь процесс интерпретации, т.е. опора лишь на автоматическую минимизацию невязки крайне редко может дать хотя бы приемлемый результат. Так как даже в самых спокойных условиях на данные ВЭЗ действует множество искажающих факторов и более 70% кривых ВЭЗ искажены (см. главу 3), самое точное совмещение с искаженной экспериментальной кривой не может дать точного решения.

Путь к геологически оптимальному решению изложен в главе 3 и включает приемы подавления искажений и использования одномерной интерпретации только как части общей технологии интерпретации данных ВЭЗ в условиях горизонтально-неоднородных сред. Специальная методика обработки позволяет разделить профильные данные на три составляющие: геологическую помеху, вызванную приповерхностными неоднородностями, глубинные неоднородности, и горизонтально-слоистую часть разреза, пригодную для одномерной интерпретации. Таким образом пакет IPI-1D и количественная интерпретация в рамках горизонтально-слоистых моделей могут использоваться и при обработке данных ВЭЗ в неоднородных средах.

Глава 3. МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

Введение

В данной главе, говоря о методе сопротивлений, мы будем подразумевать прежде всего вертикальные электрические зондирования. Сама горизонтально-неоднородная среда рассматривается как сочетание фонового горизонтально-слоистого разреза, глубинных двумерных или трехмерных объектов и приповерхностных неоднородностей. Для эффективного применения метода ВЭЗ к изучению горизонтально-неоднородных сред нужно иметь алгоритмы и программы для решения прямой задачи ВЭЗ в неоднородных средах, представлять основные эффекты проявления неоднородностей, и с их учетом разработать методику полевых наблюдений и последующей обработки и интерпретации данных ВЭЗ. К настоящему времени на кафедре геофизики геологического факультета МГУ создан набор программ для моделирования электрических полей в неоднородных средах, включающий программы для двумерных IE2DL, IE2DP1, IE2DP2, FDM2D и трехмерных сред IE3D1, IE3D2. С помощью этих программ было выполнено большое число расчетов для различных моделей сред, содержащих неоднородности, как приповерхностные, так и глубинные. Разработана классификация искажений ([84], ч.1 и 2) и способы их выявления и учета. В данной главе основное внимание будет уделено вопросу искажения кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями.

Классическая модель и методика ВЭЗ

Классическая модель исследования для метода ВЭЗ - это модель горизонтально-слоистого разреза. Для нее теоретически обоснована и за много лет идеально практически отработана методика наблюдений, в которой предусматривается увеличение разносов в геометрической прогрессии в соответствии с принципом глубинности ВЭЗ. Для уменьшения влияния ошибок наблюдений и помех, как правило, используется симметричная 4-х электродная установка Шлюмберже. Обычно используется несколько линий MN, что делает кривую ВЭЗ сегментированной. Точки ВЭЗ размещают по профилям или по площади. Каждая кривая интерпретируется в рамках модели ГСС, а затем строится общий разрез, где выделенные границы коррелируются между точками ВЭЗ. Такая методика

подчиняется идее "электробурения" - есть отдельные точки, в которых исследовано изменение удельного сопротивления с глубиной, а затем на геоэлектрическом разрезе все точки собираются в единое целое путем корреляции геоэлектрических горизонтов.

Определение искажений

При совмещении экспериментальных кривых ВЭЗ с теоретическими нередко обнаруживается неполное совпадение кривых. Оно может быть вызвано случайными ошибками измерений и такими геологическими особенностями строения, которые не укладываются в рамки ГСС. Будем понимать под локально-нормальной кривой ВЭЗ такую, которая соответствует реальному разрезу в точке зондирования, если все границы раздела слоев, пересеченные вертикальной скважиной, будут горизонтальны. Отличия кривой ВЭЗ от локально-нормальной в данной точке будем называть искажениями.

Признаки искажений кривых ВЭЗ

Для обнаружения искажений сформулируем признаки их проявления на кривых ВЭЗ. Мы различаем несколько групп таких признаков:

1. Для отдельной непрерывной кривой ВЭЗ: а) когда участок кривой ВЭЗ идет вверх под углом круче 45 ; б) идет вниз круче, чем кривая с $\mu=0$; в) имеются отдельные резкие экстремумы или изломы на кривой, которые нельзя совместить с теоретической кривой.
2. Для сегментированной кривой ВЭЗ: большие расстояния по вертикали между сегментами; пересечение сегментов или иное их расположение, не соответствующее теоретическому.
3. Для профиля ВЭЗ: резкие изменения формы или уровня кривых ВЭЗ при переходе от точки к точке, когда расстояние между точками зондирования меньше максимальной глубины исследования.
3. Для пары трехэлектродных кривых ВЭЗ, измеренных в одной точке (AMN+MNB): различия в форме этих двух кривых. Анализ полевых данных ВЭЗ для различных регионов показал, что перечисленные признаки искажений кривых, даже в самых спокойных геоэлектрических условиях, обнаруживаются на более чем 70% кривых ВЭЗ. Таким образом, можно считать установленным следующий факт: искажения кривых ВЭЗ в той или иной степени выявляются почти на всех кривых. Причинами искажений являются геологические неоднородности. Интер-

претация в рамках ГСС искаженных кривых дает неверные результаты. Поэтому необходимо считать искажающие неоднородности неотъемлемым элементом модели ВЭЗ и так изменить технологию ВЭЗ, чтобы минимизировать ущерб от искажений. Новая модель разреза, должна включать источники искажений. На ее основе можно построить новую технологию ВЭЗ.

Модель среды с приповерхностными неоднородностями

Все неоднородности можно разделить на приповерхностные и глубинные. Приповерхностные неоднородности обычно не представляют интереса и являются чистой геологической помехой. Глубинные, как правило, являются объектом поиска. Но влияние приповерхностных неоднородностей во много раз сильнее глубинных, так как они расположены ближе к точкам возбуждения и измерения поля. Когда приповерхностных помех много и влияние их заметно, их действие подобно эффекту разбитого стекла или покрытой рябью поверхности моря, препятствующих обнаружению за ними более глубоких объектов. Так как влияние приповерхностных помех превышает эффект от глубинных объектов, то первые помехи совершенно необходимо удалить перед интерпретацией.

3.1. Основные типы искажений кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями

В процессе изучения искажений от приповерхностных неоднородностей было установлено, что их искажающее влияние может быть двух основных типов - это искажения неоднородностями, расположенными вблизи измерительных электродов и вблизи питающих электродов.

Р-эффект

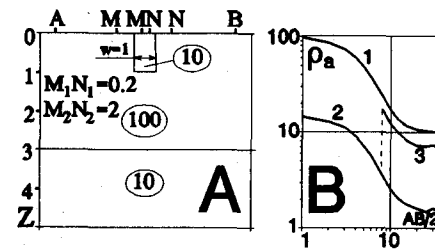


Рис.3.1.1. Р-эффект на сегментированной кривой ВЭЗ

Искажения неоднородностями вблизи приемных электродов получили название Р (или S) эффект. Р - от "potential" - измерительных электродов, а S - был впервые назван М.Н.Бердичевским и использовался в МТЗ для описания аналогичного эффекта; от "sigma" - проводимость. Р-эффект

проявляется как вертикальный сдвиг всей кривой или ее сегментов по оси сопротивлений без изменения формы. Объяснение Р-эффекта можно дать с помощью формулы:

$$\rho_K = K \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho_{MN} \cdot I_{MN}}{I_0} = \frac{E_{MN}}{I_0}, \quad (1)$$

где главной причиной Р-эффекта следует считать изменение ρ_{MN} на приповерхностной неоднородности. Если кривая несегментирована, то Р-эффект обнаруживается при сопоставлении этой кривой с соседними, а для сегментированной кривой - по заметному расхождению сегментов по вертикали при сохранении общей формы кривой (рис.3.1.1). Устранение Р-эффекта называется нормализацией кривой. Для сегментированной кривой сначала осуществляется частичная нормализация (все сегменты сдвигаются до соприкосновения друг с другом). Сопоставляя кривые по профилю, можно осуществить более

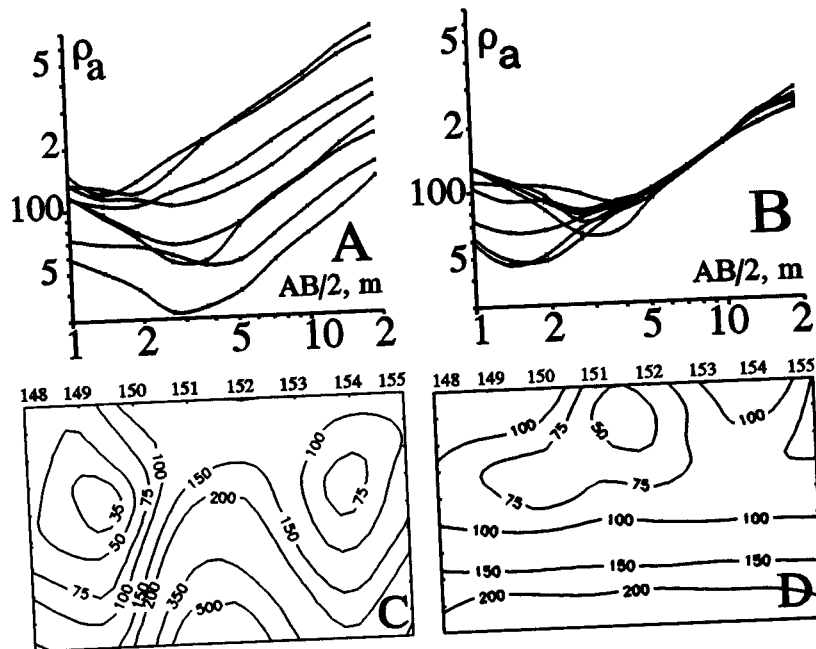


Рис.3.1.2. Р-эффект на полевых данных ВЭЗ (д.Красное, Кул.ково поле)

полную нормализацию, приводя все кривые к одному базовому уровню - к той части всех кривых, которая наиболее выдержана по профилю (рис.3.1.2). На рис. 3.1.2 показаны практические результаты ВЭЗ на археологическом объекте у дер. Красное на Куликовом поле. Шаг между зондированиями равен 1 м, а максимальные разносы - до 20 м. Разный уровень кривых ВЭЗ на рис.3.1.2,а не может быть вызван глубинными объектами, хотя на разрезе ρ_K изолинии напоминают волнистую структуру. После нормализации кривых разрез ρ_K выглядит как горизонтально-слоистый (рис.3.1.2,д).

С - эффект

С-эффект - это искажения кривых ВЭЗ приповерхностными неоднородностями вблизи питающих электродов (С от слова "current"). Он был обнаружен в 1991 г., сначала на результатах математического моделирования и лишь после этого на экспериментальных данных [45]. Причина в том, что при

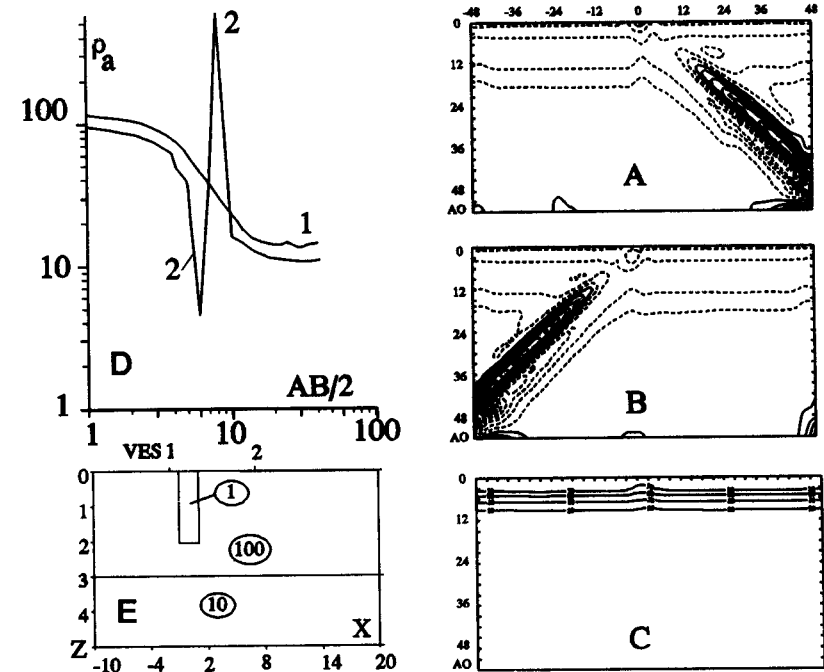


Рис.3.1.3. С-эффект для двухслойной модели с ППН $5^\circ 1522$

стандартной методике зондирования и на разрезе кажущихся сопротивлений его очень трудно распознать. С-эффект на теоретической модели двухслойной среды с одной приповерхностной неоднородностью показан на рис.3.1.3 (E - модель разреза; D - кривые ВЭЗ, искаженные С-эффектом; A, B - разрезы ρ_k для AMN и MNB установок, C - разрез ρ_k после устранения С-эффекта). Когда питающий электрод попадает в неоднородность, кривая ВЭЗ заметно искажается на 1-2 разности за счет резкого перераспределения плотности тока в разрезе (J_{MN} в формуле 1). С-эффект обладает рядом особенностей, делающих его еще более опасным, чем Р-эффект: а) изменяется форма кривой и следовательно тип разреза и видимое число слоев; б) на серии кривых ВЭЗ по профилю он проявляется на разрезе ρ_k как наклонный слой, причем с использованием логарифмического масштаба по оси разности он выглядит изогнутым; в) при стандартной методике зондирования с 4-х электродной установкой Шлюмберже и логарифмическим шагом увеличения разности, С-эффект может возникать то от электрода А, то от В, и на соседних кривых по профилю проявляться нерегулярно, лишь при точном попадании питающего электрода в неоднородность. При этом пропадает главный диагностический признак - форма искажения; г) на разрезах ρ_k С-эффект виден не очень заметно за счет фоновых изменений поля.

Для четкого обнаружения С-эффекта требуется специальная методика полевых наблюдений и процедура визуализации, соответствующие изменившейся модели исследования.

3.2. Полная модель и методика ее исследования

Полная модель исследования, используемая для совершенствования методики полевых наблюдений и интерпретации включает три компонента: горизонтально-слоистую структуру, глубинные и приповерхностные неоднородности. Методика работ должна учитывать особенности этой модели.

Размеры глубинных неоднородностей, когда они представляют интерес для исследования, определяют шаг зондирования, а глубина залегания - требуемую максимальную глубину. Приповерхностные неоднородности обычно не представляют интереса, а их размеры настолько малы, что невозможно определять детальность исследования на основе учета их размеров. Но игнорировать наличие приповерхностных

неоднородностей нельзя. Тогда надо минимизировать число попаданий питающих электродов в неоднородности, а так как их расположение неизвестно, то выполнять зондирования увеличивая разности с арифметическим шагом, равным расстоянию между зондированиями, для того, чтобы от разных точек ВЭЗ питающие электроды попадали в одни и те же точки. Арифметический шаг роста разности не согласуется с принципами зондирования, но необходим для выявления приповерхностных неоднородностей. Искажения приповерхностными неоднородностями вблизи питающих электродов при увеличении разности в геометрической прогрессии проявляются в поле ρ_k как случайная геологическая помеха, а при линейном увеличении разности с шагом равным шагу между точками ВЭЗ - как регулярная помеха. В последнем случае эту помеху значительно легче обнаружить, диагностировать и впоследствии - удалить. Желательно выполнять зондирования с одним питающим электродом (AMN+MNB), а не двумя (AMNB), так как в этом случае легче разобраться с диагностической искажений.

Визуализация данных ВЭЗ для новой методики измерений

Изображение кривой ВЭЗ как зависимость $\rho_k = f(r)$ удобно для анализа собственно зондирования горизонтально-слоистой структуры. Так как новая модель более сложная, то для каждого ее элемента (глубинных и поверхностных неоднородностей, Р и С эффектов и слоистой структуры) должен быть найден свой оптимальный способ визуализации. Для этой цели был создан программный комплекс IPI-2D, позволяющий изображать данные ВЭЗ в разных видах.

1. Разрезы ρ_k для AMN и MNB дают первое, самое общее представление о разрезе, степени его горизонтальной неоднородности и проявлении Р-эффекта. На экране монитора одновременно изображаются два разреза ρ_k - сверху для AMN, внизу - для MNB (см. рис.3.4.2).
2. Дифференциально-разностная (или D) трансформация - сверху разность AMN и MNB, внизу - горизонтальная производная от верхней трансформации. По этим изображениям выявляются места наиболее сильных искажений глубинными объектами (см. рис.3.4.3).
3. Вертикальные производные (по разности) (или V-трансформация) - наиболее эффективны для выявления С-эффекта. Для

большей выразительности изображения используется линейный масштаб по вертикальной оси (Z) (рис.3.4.5). Дополнительным эффективным приемом является перенос точки записи от середины MN к питающему электроду А для верхней и В для нижней картинки (X) (рис.3.4.6). Когда программе указан шаг по разносам и он совпадает с шагом по точкам ВЭЗ, то данный режим на рисунках дает С-эффект в виде вертикальных аномалий, облегчающих распознавание эффекта. Подобная визуализация данных ВЭЗ ставит своей целью оценить на качественном уровне степень проявленности элементов новой модели - горизонтальной структуры, глубинной или приповерхностной неоднородности, Р и С эффекты. В некоторых случаях с помощью трансформаций удается увидеть глубинный объект на фоне приповерхностных искажений, в других случаях сначала требуется удалить приповерхностные искажения.

3.3. Способы исключения искажений, вызванных ППН Исключение Р-эффекта

Для удаления Р-эффекта может быть использовано несколько процедур: 1) ручная визуальная нормализация (приведение всех кривых к одному выбранному заранее уровню по одному, общему для всех кривых ВЭЗ участку кривых); 2) "мягкая" нормализация в программе IPI-2D, сближение кривых по уровню; 3) статистическая нормализация на основе метода главных компонент (алгоритма МРС); 4) статистическая нормализация на основе алгоритма медианной полировки. Набор из нескольких способов устранения Р-эффекта с одной стороны сложился исторически, в процессе опробования разных алгоритмов, а с другой стороны подчеркивает незаконченность поиска лучшего алгоритма.

Удаление С-эффекта

Для удаления С-эффекта может эффективно использоваться алгоритм МРС (пока это самый эффективный способ) и медианная полировка (при условии строго квадратной сети наблюдений - шаг по разносам равен шагу между зондированиями).

Метод главных компонент (алгоритм МРС)

Подробнее остановимся на методе главных компонент. Алгоритм МРС (Method of Principal Components) является одной из форм факторного анализа - широко известного в статистике. Факторный анализ часто используется для обработки

многомерной статистической геофизической информации [12]. МГК позволяет разложить поля признаков на линейно независимые компоненты по степени возрастания дисперсии. При этом геофизические аномалии могут быть выявлены на одной или нескольких компонентах, если в этих компонентах удастся разделить функции распределения от изучаемых объектов. Весьма доходчиво и подробно основы метода главных компонент изложены в книге Дж.Дэвиса (Статистический анализ данных в геологии, т.2. М., 1990). Впервые метод главных компонент для анализа разрезов кажущегося сопротивления, полученных над двумерными геоэлектрическими структурами, использовал Р.Венцалек в своей диссертационной работе [11]. Венцалек ограничился лишь общей констатацией некоторых особенностей аномального поля, не связывая их проявления с определенными типами искажений кривых ВЭЗ. По его мнению на 2-ой компоненте наиболее четко выделяются аномалии типа "нефтяная залежь". Однако нами при подробном анализе работы Венцалека было отмечено, что на 1-ой компоненте хорошо выделяется горизонтально-слоистая часть и Р-эффект. Поэтому для анализа разрезов кажущегося сопротивления нами была создана своя версия программы для метода главных компонент.

В применении к вертикальным электрическим зондированиям идею метода можно сформулировать следующим образом. Пусть на профиле наблюдений зарегистрированы значения кажущегося сопротивления на N разносах и M пикетах. Будем считать совокупность значений кажущегося сопротивления на каждом разносе за отдельный признак. Тогда каждый пикет будет выглядеть как точка в N-мерном пространстве, и у нас будет M таких точек. Границы области распространения точек в N-мерном пространстве примерно описываются N-осным эллипсоидом. Задача МГК - повернуть оси координат так, чтобы они были направлены вдоль осей N-осного эллипсоида. Тогда проекции точек на новые оси нам дадут независимые, некоррелируемые параметры, которые и называются главными компонентами. Для того, чтобы новые значения имели физический смысл, их проецируют на старые оси и получают величины, похожие на исходные поля. При этом первой компонентой можно считать проекции на первую ось исходных параметров. Сумма всех главных компонент дает нам исходное поле (в данном случае полевой разрез кажу-

щегося сопротивления). При отбрасывании компонент высокого ранга, дающих небольшой вклад в общую дисперсию поля, МГК работает как метод пространственной низкочастотной фильтрации, при которой максимально сохраняется форма низкочастотной составляющей, а высокочастотные аномалии эффективно подавляются. Экспериментальные исследования показали, что подавляющая часть информации о геоэлектрическом разрезе содержится в первых двух-трех компонентах. Остальные компоненты связаны с помехами (главным образом с аномалиями от питающих электродов, С-эффектом). Отбрасывание высокочастотных компонент приводит к значительному сглаживанию поля.

В течение ряда лет мы активно использовали метод главных компонент для подавления С-эффекта и низкочастотного сглаживания разрезов кажущегося сопротивления. Программа MPC, с помощью которой мы реализовали этот метод, хорошо зарекомендовала себя в разнообразных геологических условиях (Крымский геологический полигон МГУ, Подмосковье, Поволжье, Краснодарский край и Донецк). Во всех этих случаях заметно устраняется С-эффект и достаточно уверенно восстанавливается одномерный геоэлектрический разрез. Для этого необходимо на завершающей стадии обработки перед интерпретацией после MPC произвести объединение двух разрезов Amn и mnB в разрез AmnB путем суммирования.

Алгоритм медианной полировки

Алгоритм медианной полировки был предложен Тьюки, а для обработки профильных данных ВЭЗ использован Е.В.Перваго. Этот алгоритм позволяет эффективно удалять из разрезов кажущихся сопротивлений как С, так и Р-эффекты. Величины Р и С эффектов могут быть оценены отдельно для каждого пикета профиля и представлены в виде отдельных графиков. Данный алгоритм разделяет неоднородности, выходящие непосредственно на поверхность, и находящиеся на глубине.

Таким образом, методика обработки в пакете программ IPI-2D позволяет выявить эффекты искажений приповерхностными неоднородностями и удалить их, увидеть глубинные неоднородные объекты и выделить составляющую горизонтально-слоистого разреза. Слоистый разрез может быть подвергнут количественной 1D интерпретации. Глубинные объекты могут быть промоделированы с помощью расчета прямой задачи для

2D модели, включающей как эти неоднородности, так и слоистый разрез.

3.4. ПРИМЕРЫ

Пример расчета поля ρ_k для теоретической трехслойной модели с неоднородностями

Центральная часть модели показана на рис. 3.4.1. За ее пределами неоднородности отсутствуют. Общая длина области моделирования - 700 м. В первом слое находятся три объекта, имитирующие приповерхностные неоднородности (А-С). Во втором слое одна неоднородность пониженного сопротивления

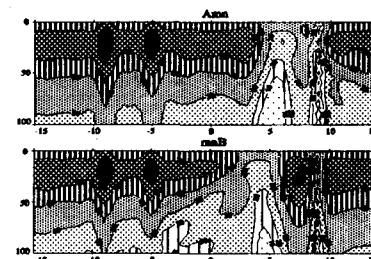
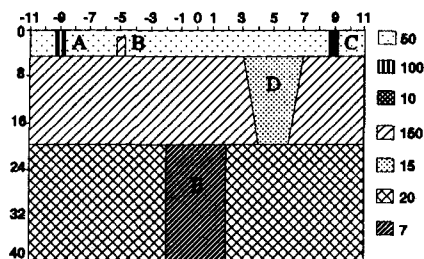


Рис.3.4.1. Модель 3-х слойной разреза с 5-ю неоднородностями

Рис.3.4.2. Разрезы ρ_k для установок AMN и MNB

пониженного сопротивления - модель тектонической зоны, являющейся основным объектом поиска (E). Шаг ВЭЗ по профилю - 10 м, разносы ВЭЗ от 3,7 до 100 м, номера пикетов ВЭЗ от -15 до +14, т.е. рабочая часть профиля - 300 м. Пикет 0 находится в середине профиля.

На рис.3.4.2 показаны разрезы ρ_k для установок AMN и MNB. Фоновый трехслойный разрез типа К сильно искажен приповерхностными неоднородностями. На пк -9, -5 и +9 это поверхностный Р-эффект, на +5 - сильный глубинный Р-эффект. С-эффект проявлен в интервале +6+14 на разрезе для AMN и в интервале +4-7 на разрезе для MNB. С-эффект на разрезе ρ_k сильнее заметен от погруженного во второй слой объекта D. Это можно объяснить особой позицией проводящей неоднородности во втором слое высокого сопротивления, приводящей к эффекту "пробоя" этого слоя и перетекания тока через неоднородность D из первого слоя в третий.

На рис.3.4.3 показаны разностная (вверху) и дифференци-

ально-разностная (внизу) трансформации. Основным источником искажений поля, выявленным этими трансформациями является палеодолина D на ПК+5. На ПК от -2 до +2 в нижней части нижнего рисунка можно увидеть слабое проявление глубинного объекта E (его положение заштриховано). Для выявления подобных глубинных объектов и создана данная трансформация. На верхнем рисунке от ПК+5 расходятся под углом 45° две зоны искажений, вызванные С-эффектом. В меньшей степени проявлен С-эффект от объекта на ПК +9. Для более точного понимания возникающих эффектов целесообразно рассмотреть эффект искажения поля ρ_k одним локальным объектом в однородном полупространстве для трехэлектродной установки (рис.3.4.4). Форма аномалии обусловлена несколькими составляющими: основной составляющей (А), отражающей объект и близкой по форме и положению к объекту, но несколько смещенной под влиянием асимметрии поля одного источника, "корнем" под аномалией или Р-эффектом (В), наклонной аномальной зоной от верхней кромки аномалии - С-эффектом (С) и рядом других более мелких деталей. Для встречной



Рис.3.4.3. D-трансформации поля ρ_k

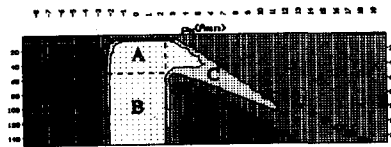


Рис.3.4.4. Поле ρ_k над моделью объекта в полупространстве

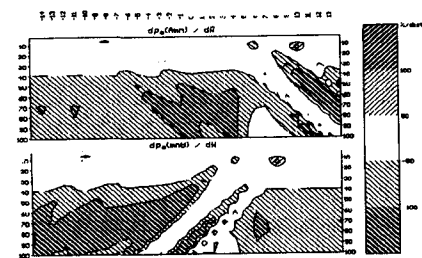


Рис.3.4.5. V-трансформация с точкой записи, отнесенной к середине MN

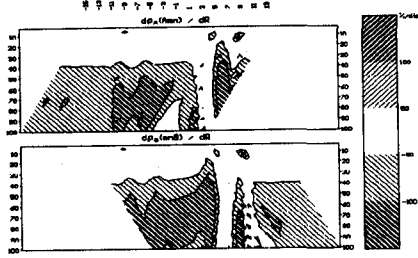


Рис.3.4.6. V-трансформация с точкой записи, отнесенной к электродам А и В

трехэлектродной установки (MNB) картина будет аналогичной, но зеркально повернутой. Разница между ними будет включать две наклонные зоны (разного знака), аномалию на месте объекта и уходящий вниз "корень", состоящие из двух зон разного знака за счет асимметрии аномалий от AMN и MNB установок. Элементы этой картины, осложненные аномалиями от соседних объектов видны на рис.3.4.3.

На рис.3.4.5 и 3.4.6 показана V-трансформация полей для AMN и MNB установок при отнесении точки записи к приемным (рис.3.4.5) и питающим (рис.3.4.6) электродам. Эта трансформация предназначена для четкой визуализации С-эффекта. На рис.3.4.5 зоны С-эффекта, при отнесении точки записи к приемным электродам, выглядят как полосы, наклоненные под 45° (вправо вниз для AMN и влево вниз для MNB). На рис.3.4.6 зоны С-эффекта, при отнесении точки записи к питающим электродам, вертикальны, что доказывает их происхождение и облегчает выявление (область ПК от -1 до +7).



Рис.3.4.7. Поле ρ_k после медианной полировки

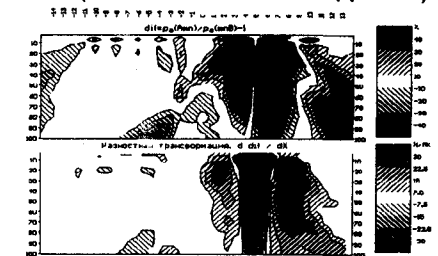


Рис.3.4.8. D-трансформация после медианной полировки

Устранение искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями, осуществляется программами Median - медианной полировки и MPC - компонентного анализа. Программа Median лучше справляется с устранением Р-эффекта. Программа MPC более эффективно удаляет С-эффект. После устранения искажений значительно уменьшается разница кривых AMN и MNB. Это позволяет преобразовать трехэлектродные ВЭЗ

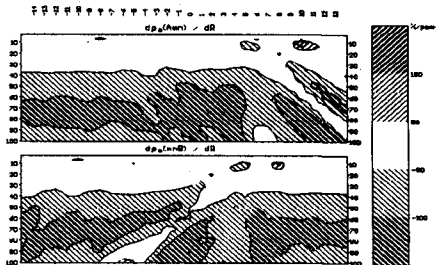


Рис.3.4.9. V-трансформация после медианной полировки

в четырехэлектродные и интерпретировать их в рамках горизонтально-слоистой модели. На рис.3.4.7-3.4.9 приведены результаты медианной полировки в виде полей ρ_K , их дифференциальных трансформаций и V-трансформаций. Р-эффект от трех приповерхностных объектов (А-С) удален практически полностью, а от погребенной долины (D) несколько ослаблен. Незначительное ослабление искажений от палеодолины связано с тем, что программа Median настроена на устранение именно приповерхностных, а не глубинных искажений.

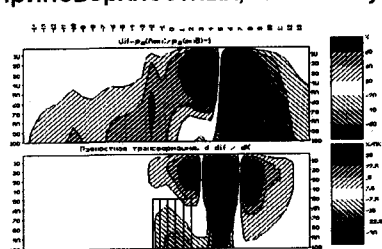


Рис.3.4.10. Дифференциальная трансформация после Median и MPC

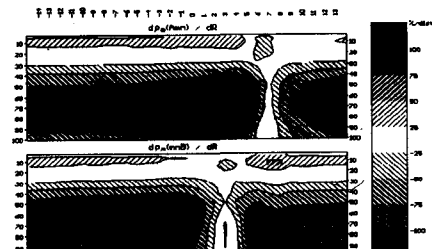


Рис.3.4.11. V-трансформация после Median и MPC

Программа компонентного анализа после медианной полировки довершает устранение искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями. Результаты работы MPC после Median показаны на рис.3.4.10-3.4.11. Рис.3.4.10 отражает поле дифференциальных трансформаций, очищенное в максимальной степени от влияния всех искажающих объектов кроме палеодолины. На рис.3.4.11 показана V-трансформация, на которой виден лишь аномальный эффект от палеодолины, а искажающие эффекты от трех приповерхностных неоднородностей еще заметные на рис.3.4.9 здесь удалены.

На рис.3.4.12 приведены результаты статистической обработки данных ВЭЗ по программе Stav из пакета IPI-1D в виде двумерных распределений плотности вероятности в координатах ρ_K -AB/2 (A-C) и графиков стандартного множителя ϵ , характеризующего величину дисперсии кривых ВЭЗ в зависимости от разноса. Рис.3.4.12, A и D-1 соответствуют исходным данным моделирования поля ρ_K без обработки, рис.3.4.12, B и D-2 - данным после медианной полировки, а рис.3.4.12, C и D-3 - данным ВЭЗ после Median, MPC и объединения кривых ρ_K для AMN и MNB в ρ_K AMNB для

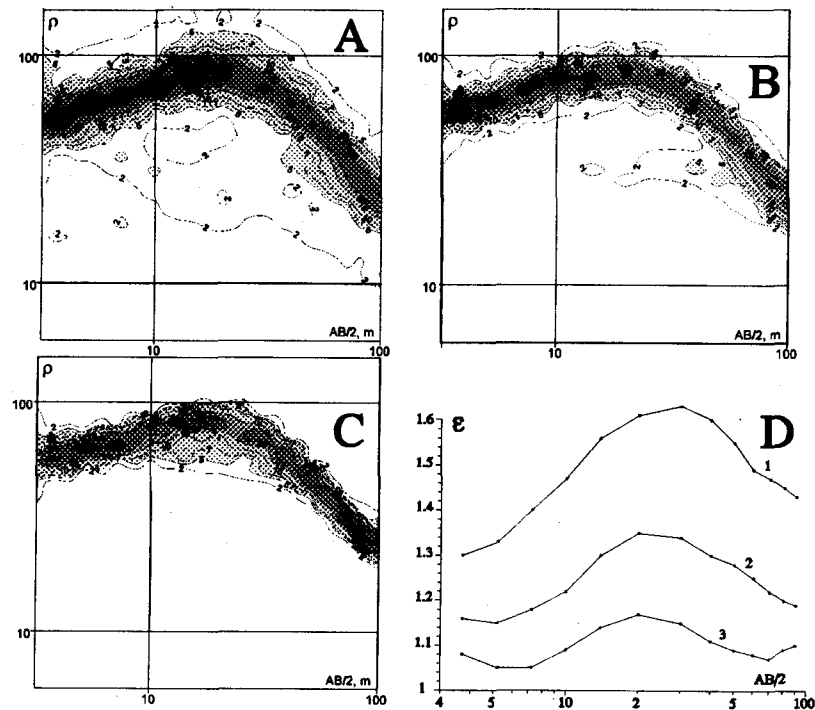


Рис.3.4.12. Статистический анализ ВЭЗ на разных стадиях обработки

симметричной четырехэлектродной установки. Максимумы дисперсии на рис.3.4.12, D приходятся на разносы 20-40 м, т.е. основная амплитуда искажений связана с палеодолиной. Вместе с тем, значительное уменьшение дисперсии после медианной полировки и MPC показывает вклад искажений приповерхностными неоднородностями в суммарную дисперсию данных и его изменение в процессе обработки. Относительно более заметное уменьшение дисперсии отмечается после Median, после MPC оно несколько слабее. Но это может быть связано и с тем, что Median лучше устраняет Р-эффект, а он сильнее проявлен в данной модели, а MPC лучше справляется с С-эффектом.

Практический пример

Продemonстрируем методику измерений и обработки ВЭЗ в неоднородных средах на примере материалов учебной

практики студентов на Крымской базе геологического факультета МГУ. Участок профиля длиной около 300 м изучен двухсторонними трехэлектродными зондированиями (AMN и MNB) с шагом ВЭЗ по профилю 10 м. Разносы АО от 2 до 20 м возрастали с шагом 2 м, а с 20 до 100 м с шагом 10 м. Участок представляет собой грабенообразную структуру, в которой тело известняков, слагающих г. Придорожную, ограничено двумя субвертикальными разломами. Вмещающий разрез сложен мергелями.

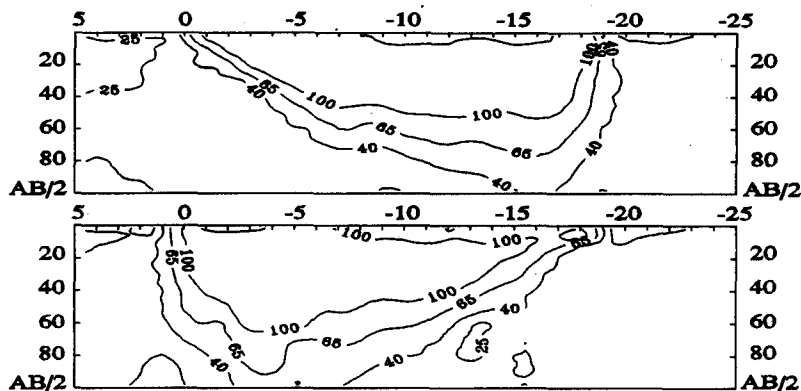


Рис. 3.4.13. Разрезы ρ_k для AMN и MNB ВЭЗ

Разрезы кажущихся сопротивлений (рис.3.4.13) очень выразительно представляют эту структуру. Хорошо заметна разница между разрезами AMN и MNB. На разрезах вертикальных производных (рис.3.4.14) видно, что основными источниками искажений являются два разлома на Пк0 и Пк-18, причем наклон наиболее резких зон под углом 45° свидетельствует о наличии сильного С-эффекта. Наиболее ярко С-эффект проявляется, когда питающий электрод переходит из высокоомного блока известняков в более проводящие мергели, поэтому для AMN он проявляется на Пк0 (электрод А идет влево), а для MNB - на Пк-18 (электрод В - вправо).

Одномерная интерпретация как трехэлектродных кривых, так и полученных из них суммированием четырехэлектродных симметричных зондирований не дает удовлетворительных результатов в силу значительных искажений полевых кривых горизонтальными неоднородностями.

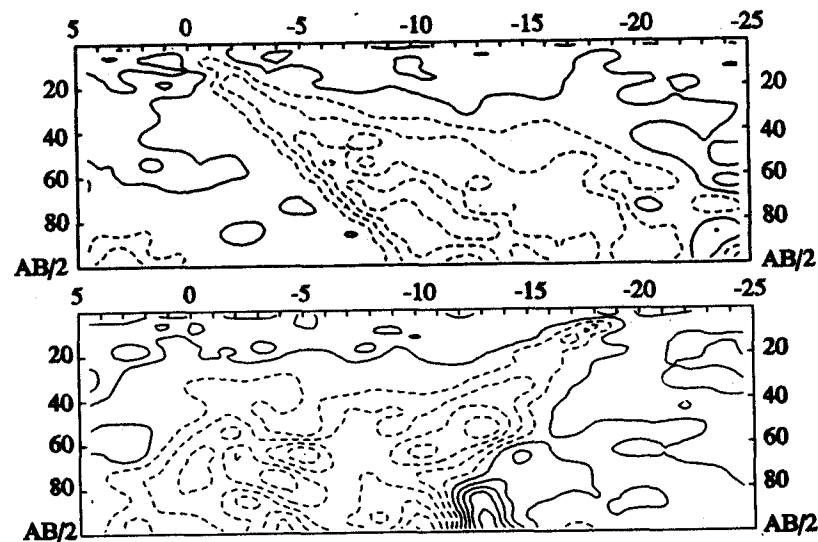


Рис.3.4.14. Разрезы вертикальных производных

Наилучшие результаты удалось получить с помощью следующей методики обработки.

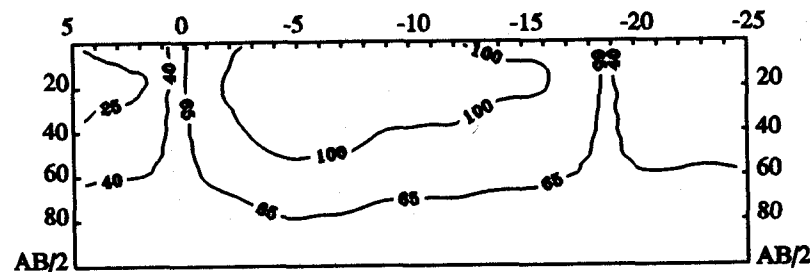


Рис.3.4.15. Разрез ρ_k после MPC и суммирования AMN и MNB

Данные трехэлектродных зондирований (AMN и MNB отдельно) обработали с помощью программы компонентного анализа (MPC) для подавления высокочастотных помех и уменьшения влияния искажений. После этой процедуры на разрезах ρ_k трехэлектродных ВЭЗ практически без искажений видна геологическая структура, что отмечается по возросшему сходству разрезов кажущегося сопротивления для установок

AMN и MNB. Различия остаются лишь на 20-метровых участках вблизи краев структуры (Пк 0-2 и -16-18). После суммирования результатов компонентного анализа для AMN и MNB получается разрез ρ_k (рис.3.4.15), наилучшим образом соответствующий априорным данным по этой структуре. На рис.3.4.16 приведены три кривые ВЭЗ для Пк-3 и разных стадий обработки: 1 - исходная полевая, 2 - кривая для AMN после компонентного анализа и 3 - кривая после MPC и суммирования AMN + MNB. Кривая 1 содержит высокочастотные помехи, которые подавляются MPC. Малая разница между кривыми 2 и 3 показывает, что именно MPC наиболее заметно исправляет кривую ВЭЗ. Косвенной оценкой работы алгоритма компонентного анализа может служить ошибка совмещения интерпретируемых кривых ВЭЗ с теоретическими. Для кривой 1 она равна 13,7%, а для кривых 2 и 3 - 1,8 и 1,4%.

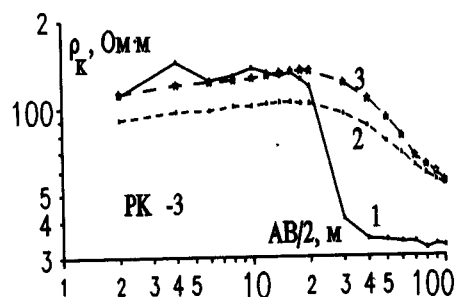


Рис.3.4.16. Кривые ВЭЗ для Пк-3

На рис.3.4.17,А показан геоэлектрический разрез по результатам одномерной интерпретации ВЭЗ на г.Придорожная. Этот разрез был использован как модель для расчета теоретического двумерного поля ρ_k по программе IE2DL. После некоторой коррекции модели (рис.3.4.17,В) получен разрез ρ_k (рис.3.4.18), весьма близкий к исходному (рис.3.4.13, верхний).

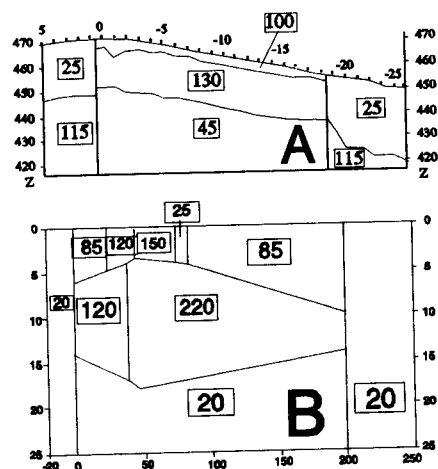


Рис.3.4.17. Геоэлектрические 1D и 2D модели г.Придорожной

Выводы к главе 3

1. Наиболее полная модель разреза, изучаемого методом ВЭЗ включает три основных компонента: горизонтально-слоистую

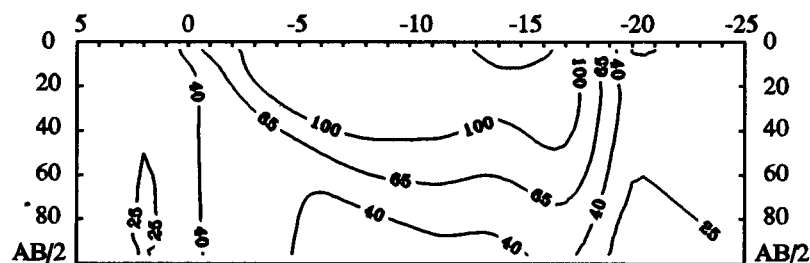


Рис.3.4.18. Разрез ρ_k , рассчитанный по IE2DL для модели с рис.3.4.17,В

составляющую, глубинные неоднородности, приповерхностные неоднородности. В частных случаях отдельные компоненты могут отсутствовать, но приповерхностные неоднородности, как правило, присутствуют и проявляются всегда.

2. Постоянное присутствие ППН требует изменения методики полевых наблюдений для их эффективного обнаружения и последующего удаления из полевых данных.

3. ППН проявляются по разному находясь вблизи приемных (Р-эффект) и питающих электродов (С-эффект).

4. Предлагаемый алгоритм обработки, реализованный в пакете программ IPI-2D, позволяет разделить наблюдаемое поле на три компонента: горизонтально-слоистую, глубинные неоднородности и приповерхностные неоднородности. ППН, являясь чистой геологической помехой, подлежат удалению из данных, после чего может быть сделана количественная 1D (пакет IPI) или 2D (пакет IE2DL) интерпретация.

5. Новая методика полевых работ наиболее эффективно может быть реализована с помощью многоканальных полевых аппаратурных комплексов, разработанных в последние годы в ряде стран (Болгария, Швеция, Япония, Германия (см. 1.5)).

6. Предлагаемая новая методика полевых измерений и обработки данных ВЭЗ позволяет решать более сложные геологические задачи, по сравнению с традиционной методикой ВЭЗ.

Глава 4. ВЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

4.1. ОСНОВЫ ВЕКТОРНОЙ СЪЕМКИ

Первичное и вторичное электрические поля, сумму которых мы измеряем в методе сопротивлений являются векторными величинами. Но векторные измерения в практике электроразведки применяются редко. Есть несколько причин для этого. 1. Широко используемая аппаратура АНЧ-3 или ЭРА не имеют возможности измерять знак сигнала, который очень важен для Y-компоненты, а для X - не имеет особого значения. 2. Y-компонента довольно чувствительна к ошибкам в углах ориентации линии MN. 3. Практические неудобства перемещения по профилю и точной установки линии MN для измерения Y-компоненты кажутся более существенными, чем выигрыш от ее измерения. При обычной наземной съемке, когда с помощью линейных установок изучаются слоистые и квазислоистые толщи, вторая компонента поля часто отсутствует ($E_y = 0,0$), хотя при измерениях вблизи двумерных и трехмерных объектов вторая компонента (E_y) поля может быть сравнима по величине с главной компонентой (E_x) (рис.4.1.1).

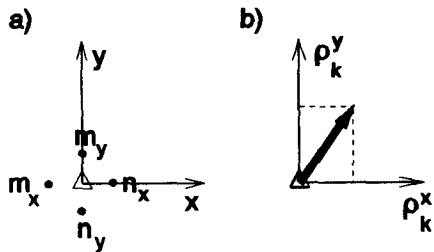


Рис. 4.1.1. Векторное представление кажущегося сопротивления

в таких условиях задача получения **максимальной информативности** от наблюдений на **ограниченной свободной площади** становится совершенно естественной и векторные наблюдения должны занять по праву принадлежащее им место. При выполнении обычных профильных или площадных наблюдений результаты измерений относят к объему среды **под** профилем или точками площади. Векторные наблюдения помогают увидеть объекты находящиеся *в стороне* от профиля

Но и в этих случаях векторным измерениям часто предпочитают площадные с линейной установкой. При проведении работ в городах нередко возникают затруднения с размещением систем наблюдений. Площади занятые асфальтом и зданиями намного превышают площади скверов и газонов вдоль тротуаров улиц. В

или иной системы наблюдений. В разделе 1.3 приводилась аналогия источника тока и направленного луча фонарика, освещающего объект. Векторные наблюдения, как будет показано ниже, помогают приблизить эту аналогию к реальности, способствуя восстановлению формы границы раздела, "освещаемой лучом" от источника тока. При исследованиях в шахтах (внутри массива горных пород) появляется возможность измерения третьей компоненты электрического поля (E_z). Характер электрического поля становится настолько сложным, что интерпретация таких полей без векторных измерений едва ли возможна. За счет обтекания током геоэлектрических неоднородностей отдельные компоненты поля могут резко меняться даже на небольшом расстоянии. Связь с разрезом кажущегося сопротивления, определенного по измерению E_x , может быть довольно причудливой. Объяснение такой картины заключается в том, что обычно при расчете ρ_k нормировку наблюдаемого поля ведут относительно той компоненты плотности тока, вдоль которой измеряют электрическое поле $\rho_k = E_x / J_{0,x}$. В неоднородных средах аномальная часть поля $E_{ан,x}$ может быть во много раз больше первичного поля $E_{0,x}$ и не совпадать с ним по знаку. В результате кажущееся сопротивление может принимать отрицательное значение, а по величине во много раз превосходить удельное сопротивление вмещающей среды. То есть кажущееся сопротивление как бы теряет физический смысл.

Такие ситуации сплошь и рядом бывают при шахтных исследованиях. Однако очень часто они остаются незамеченными, так как измерения проводятся без учета знака сигнала на приемных электродах (при работах используется аппаратура низкой частоты). В результате такие работы лишь сигнализируют об аномальном объекте где-то рядом с шахтой, но его свойства и геометрию по модулю одной из компонент поля определить чрезвычайно сложно. Такие работы больше увеличивают неопределенность, чем дают какую-то новую информацию. Именно наблюдения в горных выработках особо нуждаются в векторных измерениях в силу резко сокращенного пространства, где можно проводить возбуждение и измерение поля.

По нашему мнению с помощью векторной съемки (то есть измерения сразу нескольких компонент электрического поля с учетом знака принимаемого сигнала) может быть

найден кардинальный выход из создавшегося положения. Рассмотрим, какие преимущества это может дать. Во-первых, мы получаем объективную картину электрического поля, которое имеет место в среде. Во-вторых, с помощью векторных представлений можно значительно упростить интерпретацию полевых материалов. Известно, что при возбуждении электрического поля в неоднородной среде наряду с первичными источниками тока на внешних и внутренних границах индуцируются вторичные источники. Как раз такую ситуацию описывает метод интегральных уравнений [84]:

$$\mathbf{E}_n^E(\mathbf{M}) = \mathbf{E}_n^0(\mathbf{M}) + \int_S \mathbf{I}_s(\mathbf{P}) \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{P}, \mathbf{M})}{\partial n_M} dS, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{I}_s(\mathbf{M}) = 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cdot \mathbf{E}_n^E(\mathbf{M}). \quad (2)$$

Выражение (1) является интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода относительно интенсивности вторичных источников. Первое слагаемое - поле первичных источников, второе слагаемое описывает поле взаимодействия вторичных источников между собой, \mathbf{I}_s - плотность источника в точке \mathbf{M} , лежащей на поверхности тела.

Предположим, что мы каким-то образом сумели вычестить влияние первичного поля из суммарного наблюдаемого поля (это можно сделать, если известен вмещающий слоистый геоэлектрический разрез). Тогда *остаточное поле будет связано только с источниками на неоднородностях*.

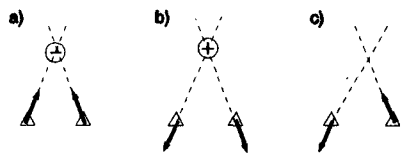


Рис.4.1.2. Схождение и расхождение векторов поля

Аномальные вектора располагаются строго в соответствии со структурой аномально-электрического поля. Векторы сходятся к отрицательным источникам и расходятся от положительных. Таким образом, если продолжить два вектора,

то они где-то пересекутся. Точка пересечения в самом грубом линейном приближении располагается вблизи эпицентра вторичного источника (рис. 4.1.2). Если построить группу векто-

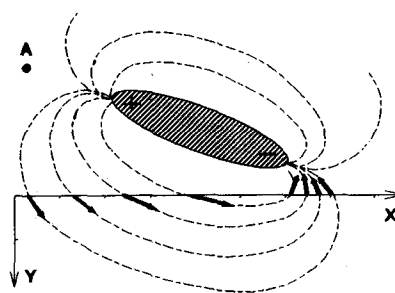
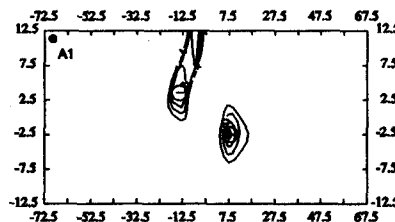


Рис.4.1.3. Поведение аномальных векторов ρ_k вблизи неоднородности

ров, то часть из них будет направлена к одному источнику, а другая - к источнику противоположного знака. На рис.4.1.3 схематически показана структура векторов ρ_k вблизи вытянутой высокоомной неоднородности, которая как бы подсвечивается питающим электродом А. Действительно, та часть тела, которая обращена в сторону первичного источника выталкивает электрический ток, который обтекает ее с внешней стороны. Такая ситуация эквивалентна тому, что на левом конце неоднородности располагаются положительные заряды. С противоположной стороны неоднородности на поверхности расположены отрицательные источники.

Если мы продолжим векторы и найдем все точки их взаимного пересечения, то эти точки лягут в какой-то компактной области вблизи эпицентров вторичных источников. Разделим всю область на квадраты, внутри которых подсчитаем количество взаимных пересечений векторов с учетом знака. Отнесем количество пересечений к центру квадрата. Тогда можно построить псевдотомограмму (карту) распределения вторичных источников в плане (рис. 4.1.4).

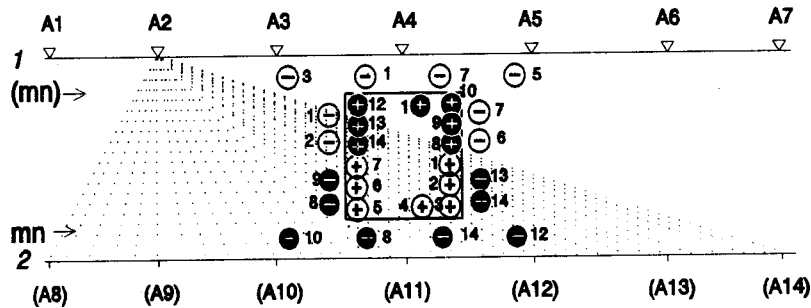
С помощью программы трехмерного моделирования IE3R1 была решена следующая задача (рис.4.1.5): две горизонтальные горные выработки длиной 145 м располагаются на большой глубине параллельно друг другу на расстоянии 30 м,



между ними находится неоднородность в виде куба со стороной 20 м. Работы проводятся с помощью просвечивания: сначала питающий электрод А проходит по одному штреку с шагом 25 м, а регистрация идет в другом штреке. Затем положение приемных и питающих электродов меняется. На рис.4.1.4 показано "распреде-

ление" вторичных токовых источников, когда питающий электрод находится в точке A_1 . Максимум и минимум на псевдотомограмме отмечен специальными значками. Если теперь на одной картинке собрать все максимумы и минимумы, которые получаются при разных положениях токовых электродов, то достаточно уверенно отрисовывается проводник, расположенный между штреками (рис. 4.1.5).

Основная идея подобной обработки состоит в том, что вторичные источники (заряды) концентрируются на поверхности неоднородности в зависимости от расположения токовых электродов. Можно оспаривать правильность и точность векторных построений, можно предлагать другие способы определения положения и интенсивности вторичных источников, но трудно отрицать, что такой способ измерения не ведет к качественно новому подходу в методике проведения электроразведочных работ и интерпретации материалов. С помощью векторной съемки из одного штрека можно определять положение неоднородностей выше, ниже или в стороне от горной выработки.



Условные обозначения:

- | | |
|---|------------------------|
| Вторичные источники при положении питающего электрода на профиле 1: | электрод на профиле 2: |
| ⊖ отрицательный | ⊖ отрицательный |
| ⊕ положительный | ⊕ положительный |
| ⊖5 вторичный источник для питающего электрода A5 | |

Рис.4.1.5. Моделирование векторной съемки при межшахтном просвечивании

Идея векторных измерений электрического поля не нова. Например, В.А.Комаров, Л.М.Иоффе и М.В.Семенов выполнили векторную съемку ВП еще в 1954 г. С тех пор накоплен некоторый опыт исследований на постоянном токе. Однако во многих серьезных монографиях, посвященных методу сопротивлений (в том числе в "Справочнике геофизика. Электроразведка" и в "Справочнике по шахтной и скважинной геофизике"), этот вопрос обойден молчанием. Поэтому для практиков векторная съемка остается до сих пор мало используемым видом работ. По нашему мнению два момента сдерживали развитие этого направления: 1) отсутствие серийной аппаратуры, с помощью которой можно вести такую съемку; 2) отсутствие аппарата интерпретации векторных измерений. Аппаратуру можно быстро получить за счет модернизации уже имеющихся моделей. Алгоритмический и программный аппарат интерпретации может быть разработан за 2-3 года.

4.2. Расчет электрического поля в горизонтально-слоистой среде

Одной из центральных проблем электроразведки постоянного тока (и в частности векторной съемки) является задача о расчете электрического поля в горизонтально-слоистой среде. Так как решение этой задачи для установок, расположенных целиком на поверхности земли, известно давно, приведем решение в наиболее общем виде, когда источники и приемники размещены произвольно внутри горизонтально-слоистой среды. В рамках решения этой проблемы мы ищем электрическое поле E_r и E_z в слоистой среде на разных уровнях глубины. Здесь и везде координата r зависит от x и y .

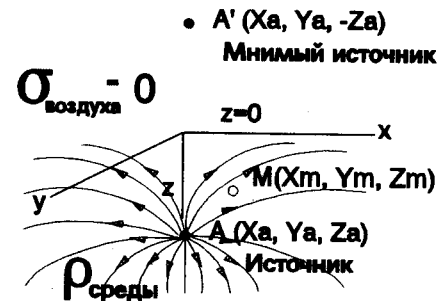


Рис.4.2.1. Источник тока в однородном полупространстве

Поле источника тока в однородном полупространстве.

Рассмотрим следующую модель (рис.4.2.1). В однородном полупространстве с удельным сопротивлением ρ располагается точечный источник постоянного тока. Верхнее полупространство

имеет бесконечно большое сопротивление. Ось y направлена на нас, ось z - вниз, а граница раздела двух полупространств совпадает с плоскостью $z=0$. Источник находится в точке P и имеет координаты (x_a, y_a, z_a) . Наблюдения производятся в точке M с координатами (x_m, y_m, z_m) .

Как известно, выражение для потенциала точечного источника, как функции координат, выглядит следующим образом:

$$U(r) = \frac{I\rho}{4\pi r}, \quad (3)$$

где:

$$r = \sqrt{(x_m - x_a)^2 + (y_m - y_a)^2 + (z_m - z_a)^2}.$$

Для решения задачи нахождения поля в слоистой среде, мы применили спектральный подход.

Электрический потенциал удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta U = 0$$

Применим к потенциалу двойное преобразование Фурье:

$$\hat{U}(k_x, k_y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, z) e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

Полученный спектральный потенциал удовлетворяет уравнению Гельмгольца:

$$\frac{\partial^2 \hat{U}(k_x, k_y, z)}{\partial z^2} - m^2 \hat{U}(k_x, k_y, z) = 0; \quad m^2 = k_x^2 + k_y^2.$$

Используя преобразование Фурье-Ханкеля, можно записать:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \hat{U}(m, z) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y = \int_0^{\infty} \hat{U}(mz) m I_0(mr) dm.$$

Введем обозначение

$$\hat{U} = \hat{U}_m \quad (4)$$

Тогда

$$U(r, z) = \int_0^{\infty} \hat{U}(m, z) I_0(mr) dm$$

$$\text{и } \hat{U}(m, z) = A e^{mz} + B e^{-mz}$$

является общим решением уравнения Гельмгольца.

Для точечного источника справедливо следующее выражение (формула Вебера-Липшица):

$$\frac{I\rho}{4\pi \sqrt{r^2 + (z - z_A)^2}} = \frac{I\rho}{4\pi} \int_0^{\infty} e^{-m|z - z_A|} I_0(mr) dm.$$

Тогда в слое с источником спектральный потенциал описывается формулой:

$$\hat{U}(m, z) = \frac{I\rho}{4\pi} e^{-m|z - z_A|} + A e^{mz} + B e^{-mz}.$$

Кроме того, спектральный потенциал должен удовлетворять следующим физическим условиям:

$$\hat{U}_I = \hat{U}_{I+1}, \quad \frac{1}{\rho_I} \frac{\partial \hat{U}_I}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{I+1}} \frac{\partial \hat{U}_{I+1}}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \hat{U}_I}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \hat{U}_N \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial \hat{U}_N}{\partial z} \right|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad \hat{U}_n \Big|_{z \rightarrow z_A} = \frac{I\rho}{4\pi} e^{-m|z - z_A|}.$$

Алгоритм прогонки для вычисления электрического поля источника постоянного тока в горизонтально-слоистой среде (алгоритм В.И.Дмитриева - А.Г.Яковлева)

Рассмотрим модель горизонтально-слоистой среды, возбуждаемой произвольно расположенным точечным источ-

ником постоянного тока. Пусть разрез состоит из N слоев, каждый из которых характеризуется удельным электрическим сопротивлением ρ_i и мощностью h_i . Глубины кровли и подошвы i -го слоя равны

z_i и z_{i+1} , соответственно. Источник находится на глубине z_a в слое n (рис. 4.2.3).

Необходимо найти значение поля E_r и E_z в любой точке среды. Эта задача решается через спектр потенциала электрического поля $\tilde{U}(m, z_m)$ и его производную по z .

Исходя из затухания поля на бесконечности, коэффициент A_N при возрастающей с глубиной экспоненте равен нулю. Таким образом, для описания спектрального потенциала в земле необходимо найти $2N-1$ неизвестных из такого же количества уравнений. Полученную систему можно решать, используя стандартные алгоритмы (например, метод исключения Гаусса). Однако, с вычислительной точки зрения более эффективен подход, предложенный В.И.Дмитриевым, основанный на методе прогонки (рис.4.2.3). Рассмотрим этот подход подробнее.

Разделим весь геоэлектрический разрез на две части - выше и ниже источника. Все константы, относящиеся к верхней части разреза, будем помечать индексом "-", а константы, относящиеся к нижней части разреза - "+". При этом слой с источником оказывается разделенным на два подслоя. В верхнем подслое мы будем иметь первичное поле в виде экспоненты, возрастающей с ростом z , а в нижнем - убывающей по z . Это

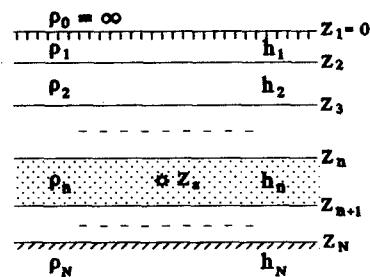


Рис.4.2.2. Модель слоистой среды с точечным источником тока

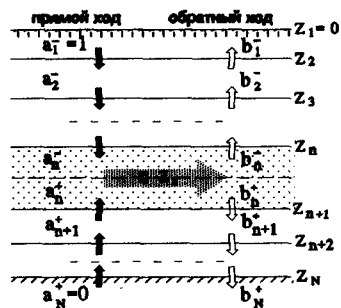


Рис.4.2.3. Схема метода прогонки

циала во всех слоях.

Для любого i -го слоя выше источника, включая верхний подслой слоя n , спектральный потенциал на частоте m можем записать в виде:

$$\tilde{U}_i(z) = b_i^- [a_i^- e^{-m(z-z_i)} + e^{m(z-z_i)}];$$

при $i=1, \dots, n; z < z_a$

Аналогично для любого i -го слоя ниже источника, включая нижний подслой слоя n , имеем:

$$\tilde{U}_i(z) = b_i^+ [e^{-m(z-z_{i+1})} + a_i^+ e^{m(z-z_{i+1})}];$$

при $i=n, \dots, N; z > z_a$;

Первичное поле источника в этих выражениях "спрятано" в константах a и b . Коэффициенты a_i и b_i связаны с используемыми ранее коэффициентами A_i и B_i следующими соотношениями:

$$\begin{cases} i < n: A_i = b_i^- e^{-mz_i}, & B_i = b_i^- a_i^- e^{mz_i}, \\ i > n: A_i = b_i^+ a_i^+ e^{-mz_{i+1}}, & B_i = b_i^+ e^{mz_{i+1}}. \end{cases}$$

Для слоя с источником

$$\begin{cases} z < z_a: A_n = b_n^- e^{-mz_n} - \frac{I \rho_n}{4\pi} e^{-mz_a}; \\ & B_n = b_n^- a_n^- e^{mz_n}; \\ z > z_a: A_n = b_n^+ a_n^+ e^{-mz_{n+1}}; \\ & B_n = b_n^+ e^{mz_{n+1}} - \frac{I \rho_n}{4\pi} e^{mz_a}. \end{cases}$$

Из условий затухания поля на бесконечности $a_N^+ = 0$, а из условия (5) имеем $a_1^- = 1$. Использование a_i и b_i вместо A_i и B_i позволяет упростить решение задачи.

Запишем граничные условия (5) для границы на глубине $z_1 < z_a$ (т.е. ниже источника), разделяющей $i-1$ и i слои:

$$\begin{aligned} b_{i-1}^- [a_{i-1}^- e^{-mh_{i-1}} + e^{mh_{i-1}}] &= b_i^- [a_i^- + 1], \\ -\frac{m}{\rho_{i-1}} b_{i-1}^- [a_{i-1}^- e^{-mh_{i-1}} - e^{mh_{i-1}}] &= -\frac{m}{\rho_i} b_i^- [a_i^- - 1]. \end{aligned} \quad (6)$$

Вынесем в левых частях системы (6) множитель $e^{mh_{i-1}}$ за скобки и разделим верхнее уравнение на нижнее

$$\rho_{i-1} \frac{a_{i-1}^- e^{-2mh_{i-1}} + 1}{a_{i-1}^- e^{-2mh_{i-1}} - 1} = \rho_i \frac{a_i^- + 1}{a_i^- - 1}.$$

Найдем соотношение, связывающие a_i^- и a_i^+ :

$$a_i^- = \frac{K_{i,i-1} + a_{i-1}^- e^{-2mh_{i-1}}}{1 + K_{i,i-1} a_{i-1}^- e^{-2mh_{i-1}}},$$

где $K_{i,i-1} = (\rho_{i-1} - \rho_i) / (\rho_{i-1} + \rho_i)$ - коэффициент отражения от границы z_i для тока, протекающего снизу вверх. Отталкиваясь от известного $a_1^- = 1$ и двигаясь снизу вверх, можно, используя последнюю формулу, рассчитать коэффициенты a_i^- для всех верхних слоев, включая слой с источником.

Найдем рекуррентные формулы для вычисления a_i^+ . Для этого запишем граничные условия (5) на границе $z_{i+1} > z_a$:

$$b_i^+ [1 + a_i^+] = b_{i+1}^+ [e^{mh_{i+1}} + a_{i+1}^+ e^{-mh_{i+1}}], \quad (7)$$

$$-\frac{mb_i^+}{\rho_i} [1 - a_i^+] = -\frac{mb_{i+1}^+}{\rho_{i+1}} [e^{mh_{i+1}} - a_{i+1}^+ e^{-mh_{i+1}}].$$

Легко заметить, что система (6) аналогична системе (7), если индексы $i-1$ заменить на $i+1$. Это позволяет, не проводя выкладок, записать соотношение для a_i^+ :

$$a_i^+ = \frac{K_{i,i+1} + a_{i+1}^+ e^{-2mh_{i+1}}}{1 + K_{i,i+1} a_{i+1}^+ e^{-2mh_{i+1}}}; \quad (8)$$

где $K_{i,i+1} = (\rho_{i+1} - \rho_i) / (\rho_{i+1} + \rho_i)$ - коэффициент отражения от границы z_{i+1} для тока, протекающего сверху вниз.

Формула (8) позволяет рассчитать все a_i^+ , двигаясь снизу вверх, отталкиваясь от известного $a_N^+ = 0$.

Рассмотрим поведение поля при переходе через уровень $z = z_a$. В слое с источником спектральный потенциал \tilde{U} представляет собой сумму спектрального потенциала первичного поля \tilde{U}_0 и некоторой добавки \tilde{U}^* , связанной со слоистостью разреза. Источники \tilde{U}^* - это неоднородности разреза, поэтому \tilde{U}^* и $\partial \tilde{U}^* / \partial z$ непрерывны на глубине $z = z_a$. Спектральный потенциал \tilde{U}_0 также непрерывен на глубине $z = z_a$, так как стремится к $I\rho_n/4\pi$ при $z \rightarrow z_a$ как сверху, так и снизу. В то же время, производная $\partial \tilde{U}_0 / \partial z$ при $z \rightarrow z_p^-$ (сверху) равна $I\rho_n m/4\pi$, а при $z \rightarrow z_p^+$ (снизу) равна $-I\rho_n m/4\pi$ (т.е. наблюдается разрыв вертикальной компоненты электрического поля).

Таким образом, можно записать условие непрерывности \tilde{U} на уровне $z = z_a$:

$$\begin{aligned} b_n^- [a_n^- e^{-m(z_a - z_n)} + e^{m(z_a - z_n)}] &= \\ = b_n^+ [e^{-m(z_a - z_{n-1})} + a_n^+ e^{m(z_a - z_{n-1})}]. \end{aligned} \quad (9)$$

Условие сопряжения для $\partial \tilde{U} / \partial z$ с учетом предельных значений $\partial \tilde{U}_0 / \partial z$ при $z \rightarrow z_a$ имеет вид:

$$\begin{aligned} -mb_n^- [a_n^- e^{-m(z_a - z_n)} - e^{m(z_a - z_n)}] - \frac{I\rho_n}{4\pi} m &= \\ = -b_n^+ m [e^{-m(z_a - z_{n-1})} - a_n^+ e^{m(z_a - z_{n-1})}] + \frac{I\rho_n}{4\pi} m. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) образуют систему с двумя неизвестными b_n^- и b_n^+ . Решая ее, находим:

$$b_n^- = \frac{I\rho_n}{4\pi} \frac{e^{-m(z_a - z_n)} [1 + a_n^+ e^{-2m(z_{n+1} - z_a)}]}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}}; \quad (11)$$

$$b_n^+ = \frac{I\rho_n}{4\pi} \frac{e^{-m(z_{n+1} - z_a)} [1 + a_n^- e^{-2m(z_a - z_n)}]}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}}. \quad (12)$$

Из выражений (11) и (12) получим рекуррентные соотношения для b_i :

$$b_{i-1}^- = b_i^- Q_{i-1}^- e^{-mh_{i-1}}, \quad Q_{i-1}^- = \frac{1 + a_i^-}{1 + a_{i-1}^- e^{-2mh_{i-1}}};$$

$$b_{i+1}^+ = b_i^+ Q_{i+1}^+ e^{-mh_{i+1}}, \quad Q_{i+1}^+ = \frac{1 + a_i^+}{1 + a_{i+1}^+ e^{-2mh_{i+1}}}.$$

Отталкиваясь от известных b_n^- и b_n^+ можно рассчитать коэффициенты b_i во всех слоях по рекуррентным формулам. Выразим b_i через b_n :

$$b_i^\pm = b_n^\pm \prod_{k=n\pm 1}^i (e^{-mh_k} \cdot Q_k^\pm). \quad (13)$$

Подставляя выражения (13) в формулы для спектрального потенциала $\tilde{U}_i(z)$ и учитывая, что:

$$e^{-m(z_a - z_n)} \cdot \prod_{k=n-1}^i e^{-mh_k} = e^{-m(z_a - z_i)}, \quad a$$

$$e^{-m(z_{n+1} - z_a)} \cdot \prod_{k=n+1}^i e^{-mh_k} = e^{-m(z_{i+1} - z_a)}.$$

получаем окончательное выражение для спектрального потенциала в i -том слое на частоте m :

$$z < z_a : \tilde{U}_i(z) = \frac{I \rho_n}{4\pi} \frac{1 + a_n^+ e^{-2m(z_{n+1} - z_a)}}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}} \prod_{k=n}^i Q_k^- \times \\ \times [a_i^- e^{-m[(z_a - z_i) + (z - z_i)]} + e^{-m(z_a - z)}];$$

$$z > z_a : \tilde{U}_i(z) = \frac{I \rho_n}{4\pi} \frac{1 + a_n^- e^{-2m(z_a - z_n)}}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}} \prod_{k=n}^i Q_k^+ \times \\ \times [a_i^+ e^{-m[(z_{i+1} - z_a) + (z_{i+1} - z)]} + e^{-m(z - z_a)}];$$

Найдем выражение для производной спектрального потенциала по z :

$$z < z_a : \frac{\partial \tilde{U}_i(z)}{\partial z} = \frac{I \rho_n m}{4\pi} \frac{1 + a_n^+ e^{-2m(z_{n+1} - z_a)}}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}} \prod_{k=n}^i Q_k^- \times \\ \times [a_i^- e^{-m[(z_a - z_i) + (z - z_i)]} - e^{-m(z_a - z)}];$$

$$z > z_a : \frac{\partial \tilde{U}_i(z)}{\partial z} = \frac{I \rho_n m}{4\pi} \frac{1 + a_n^- e^{-2m(z_a - z_n)}}{1 - a_n^+ a_n^- e^{-2mh_n}} \prod_{k=n}^i Q_k^+ \times \\ \times [e^{-m(z - z_a)} - a_i^+ e^{-m[(z_{i+1} - z_a) + (z_{i+1} - z)]}].$$

Полученное решение для спектрального потенциала и его производных позволяет с помощью линейной фильтрации рассчитать потенциал и компоненты электрического поля. Описанный выше алгоритм используется на всех стадиях векторной съемки: при теоретических расчетах электрического поля первичных источников, а также при расчетах первичных и вторичных (аномальных) полей в слоистой среде при численном моделировании с использованием алгоритма метода интегральных уравнений. В силу важности этого алгоритма мы повторили решение, изложенное в первой части "Электрических зондирований геологической среды" (1988), устранив все замеченные неточности и опечатки.

4.3. ПРИМЕР НАЗЕМНОЙ ВЕКТОРНОЙ СЪЕМКИ

Введение

Летом 1993 года мы впервые опробовали методику векторной съемки применительно к гидрогеологическим задачам при наземных исследованиях в г.Донецке.

Для проведения работ нами была модернизирована аппаратура АНЧ-3. В результате на измеритель по двухжильному проводу стал подаваться опорный сигнал с генератора. Если фазы измерительного и опорного сигнала совпадали, то такой сигнал на MN для последовательности электродов А М N В считался положительным. Если наблюдалось обратное соотношение, то - отрицательным.

Второй особенностью этих исследований было то, что они сильно напоминали ситуацию, связанную с шахтными работами (междушахтное просвечивание с целью изучения выемочного ствола). Наблюдения могли быть проведены только по двум

профилям с двух разных сторон от дома, в пределах вытянутых вдоль строения газонов (рис.4.3.1). При этом изучалась обводненность горных пород под фундаментом нового жилого двухсекционного дома по ул. Пухова в г.Донецке.

На карте проекта упрочнения пород под строительство жилых домов это строение обозначено под номером 7. Проблема дополнительного укрепления фундамента возникла после начала строительства. До строительства на территории всего микрорайона институтом УкрНИМИ были проведены детальные геолого-геофизические исследования с целью выявления старых горных выработок под проектируемыми фундаментами зданий на глубинах от 10 до 50 м. В результате были сделаны рекомендации для проведения тампонажных работ, предназначенных для цементации основания. На территории всего микрорайона перед началом заложения фундаментов домов было пробурено свыше 200 скважин (около 20 - 30 скважин под каждый дом) и проведено тампонирующее подзаполнение подземных пустот водно-цементным раствором. После завершения этих работ началось возведение зданий. После строительства трехсекционного дома со всей очевидностью проявились недостатки проведенных работ по укреплению грунтов: Одна из секций этого дома испытала неравномерное катастрофическое проседание и теперь налегает на другую его секцию. На взгляд геологов эта ситуация вызвана разубоживанием грунтов при тампонирующем цементным раствором, в котором значительно преобладала вода.

Геологическая ситуация

На площади работ наблюдается моноклиналиное падение коренных пород каменноугольного возраста на север под углом около 10°. Сверху залегают современные отложения мощностью около 2 м, которые подстилаются слоем суглинков мощностью до 10 м. Ниже располагается аргиллитовая - алевролитовая толща мощностью 5 - 10 м. На глубине 8 - 15 м залегают угольный пласт, над и под которым расположен песчаник мощностью около 1 - 2 м.

Методика работ

Работы проводились по методике векторной съемки электрического поля постоянного тока с трехэлектродной установкой. Электрод В относился в "бесконечность". Однако при расчете нормального поля его влияние формально учитывалось, как поле удаленного на определенное расстоя-

ние питающего точечного электрода. Поле электрода А рассчитывалось как поле вертикального линейного электрода, имеющего верхнее и нижнее ограничение в зависимости от уровня воды в скважине.

Измерения проводились по двум профилям (см.рис.4.3.2). При этом профиль 1 располагался севернее дома, профиль 2 - южнее. Шаг по профилю наблюдений составлял 1 м. Длина линии MN - 5 м. Разности потенциалов dU_x и dU_y измерялись двумя взаимно перпендикулярными линиями MN с учетом знака сигнала в измерительной линии.

Обработка полевых материалов

Обработка велась по следующему алгоритму. Сначала рассчитывались компоненты электрического поля:

$$E_x = \Delta U_x / MN_x; \quad E_y = \Delta U_y / MN_y.$$

Затем производилась нормировка компонент поля для учета сферического расхождения тока в однородном полупространстве:

$$\bar{\rho}_k = E / |J_0|. \quad (14)$$

Модуль плотности первичного тока рассчитывался по формуле

$$|J_0| = \sqrt{J_{0,x}^2 + J_{0,y}^2}.$$

В дальнейшем к полученной кривой по профилю для каждого положения источника подыскивалось такое сопротивление среды ρ , которое обеспечивало минимальную невязку между экспериментальными и теоретическими значениями модуля кажущегося сопротивления:

$$\bar{\rho}_k^{ан} = \operatorname{argmin} \left| \bar{\rho}_k^{набл} - \bar{\rho}_k^{теор} \right|, \quad (15)$$

где

$$|\bar{\rho}| = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2};$$

$$\bar{\rho}_k^{теор} = \rho \cdot J_0 / |J_0|.$$

Таким образом рассчитывались аномальные компоненты

кажущегося сопротивления:

$$\bar{\rho}_k^{ан} = \bar{\rho}_k^{набл} - \bar{\rho}_k^{теор}$$

В дальнейшем в каждой точке наблюдения строился вектор аномального сопротивления. Так как влияние первичных питающих электродов в аномальном поле отсутствует, то источником аномального поля являются вторичные заряды, которые индуцируются на поверхностях локальных неоднородностей и на их внутренних границах. Основная идея обработки данных векторной съемки заключается в том, что сближение векторов в плане показывает наличие отрицательных источников, расхождение - положительных источников. Как показывает опыт численного моделирования, при разных положениях питающих электродов высвечиваются разные участки поверхности неоднородности или разные неоднородности. С другой стороны число плюсов не всегда равно числу минусов, так как области стоков и истоков на неоднородностях могут располагаться на разной глубине. В результате часть источников от локальной неоднородности может быть не

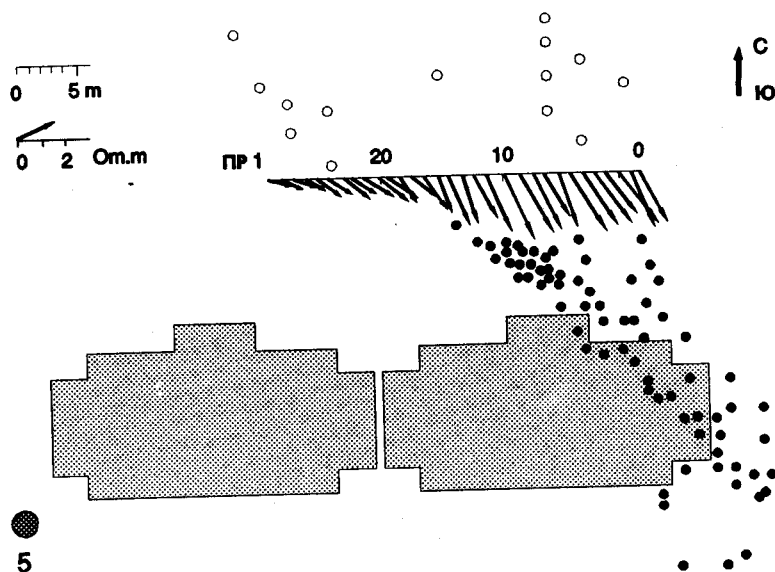


Рис.4.3.1. Пример векторных построений

видна. И последнее, за счет двумерной площадной взаимозависимости векторов такая съемка позволяет "рассмотреть" объекты, которые расположены на некотором удалении от профиля наблюдений (например под домом или между стволами шахты).

Пример построения векторной диаграммы показан на рис.4.3.1. Источник первичного поля находился в скв.5, измерения велись по профилю 1.

Результаты работ

Результаты работ показаны на рис.4.3.2. Область, расположенная в северо-восточной части участка, и заштрихованная сплошными линиями четко выделяется по наблюдениям по пр.1 со скважин 5,6,7,8. Границы этой зоны достаточно плотно ложатся в плане друг к другу, отражая разные участки поверхности проводящей неоднородности. По нашему мнению эта аномалия соответствует разуплотненной обводненной зоне, в которой весьма вероятно наличие крупных пустот. Это мнение основано еще на том факте, что попавшая в эту зону скв. 4 была водообильна и при ее бурении наблюдался провал бурового инструмента. Часть этой зоны проходит под восточным краем дома 7. Аналогичная зона наблюдается в районе скважины 7 и профиля 2 (скв. 7 и 8 были водообильны). Однако эта зона локальна и под дом возможно не распространяется.

От электрода на скважине 1 наблюдается большая отрицательная аномалия, захватывающая центральную часть дома 7. Вероятно, ее можно трактовать как зону средней водонасыщенности пород (хотя скв. 2, которая находится в непосредственной близости от дома 7 в пределах этой зоны была очень водообильна). Аномалии от электродов на скв. 2 и 4 четко указывают на положение высокоомной зоны, расположенной в юго-западной части участка. В эту зону попадают сухие скважины 5 и 1.

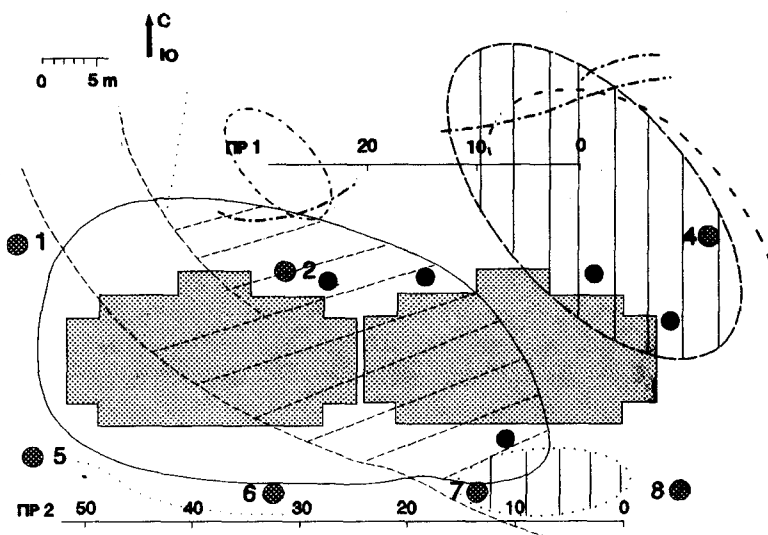
Таким образом, наибольшей опасности подвержено северо-восточное крыло дома 7. Здесь обязательно проведение осушительных и дополнительных тампонажных работ. В юго-западной части дома грунты сухие. Для повышения надежности было рекомендовано провести упрочнение средней части дома с северной стороны.

Выводы

1. Для изучения сложно построенных трехмерно-неодно-

родных сред, окружающих горные выработки, целесообразно применять многокомпонентную векторную съемку электрического поля.

2. На модельных примерах, рассчитанных с помощью программы IE3R1, показана эффективность векторной съемки.



Условные обозначения:

- сильно обводненные зоны с предполагаемыми пустотами

- зоны со средней обводненностью

- осушенные зоны

Границы аномальных зон при положении источников в :

	скв. 1		скв. 5
	скв. 2		скв. 6
	скв. 4		скв. 7
			скв. 8

1 - скважина и ее номер

- скважины, предлагаемые для бурения и тампонажных работ;

3. Для внедрения векторной съемки на первом этапе необходима модернизация имеющейся аппаратуры, а на втором этапе - создание многоканальной шахтной электроразвечной станции, способной в автоматическом режиме вести многоканальную трехкомпонентную регистрацию электрического поля. Мировой уровень многоканальной аппаратуры представлен системами АВЕМ (96 каналов), ОУО (750 каналов), Geso-rakla (460 каналов) и др. (см. раздел 1.5).

Рис.4.3.2. Результаты векторной съемки, проведенной в 1993 г.

Глава 5. ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

ВВЕДЕНИЕ

Проблема анизотропии давно привлекает внимание исследователей, так как является одним из наиболее интересных и парадоксальных вопросов электроразведки. Значительный вклад в изучение этого вопроса внесли следующие школы геофизиков: Московская (А.И.Заборовский, А.А.Огильви), Санкт-Петербургская (С.М.Шейнманн, А.С.Семенов, А.В.Вешев, А.Ф.Фокин), Екатеринбургская (Ю.М.Гуревич, А.А.Редозубов, С.С.Сысков). Большая работа по вопросам изучения электрической анизотропии недавно опубликована за рубежом [98].

Причины, вызывающие анизотропию свойств горных пород: слоистость, особенности текстуры и структуры, существование преобладающего направления трещиноватости, наличие напряженного состояния и др. Многие осадочные и метаморфические породы с явно выраженной слоистостью (микрослоистостью) являются анизотропными по удельному электрическому сопротивлению. В зернистых породах с определенной ориентировкой удлиненных или сплюснутых зерен анизотропия может быть следствием зернистости. Электрическая анизотропия горных пород проявляется в зависимости УЭС породы от различных направлений. Истинное УЭС вкрест слоистости превышает УЭС вдоль нее. Будем различать случаи анизотропии электрических свойств для горизонтально-слоистых сред и негоризонтальных напластований. При горизонтальном залегании анизотропной толщи свойство анизотропии сказывается неявным образом, и обнаруживается по завышению мощностей слоев, оцениваемых в ходе интерпретации электрических зондирований. Когда же анизотропная толща залегает наклонно или вертикально, то анизотропия обнаруживается явно, например с помощью кругового профилирования и проявляется в зависимости значений кажущегося сопротивления от ориентации установки. При этом кажущееся сопротивление вкрест слоистости нередко оказывается меньше ρ_k вдоль слоистости. Этот известный факт получил название **парадокса анизотропии** [10,20]. Термин "парадокс" хорошо подходит для описания явления анизотропии, при изучении которой довольно часто приходится встречаться с неожиданными и противоречивыми эффектами. Примеры таких эффектов можно начать с УЭС анизотропных сред. Рассмотрим анизотропию слоистости,

вызванную чередованием двух тонких слоев равной мощности, но различного сопротивления. Из представлений о последовательно и параллельно соединенных проводниках можно предположить, что УЭС такой среды вкрест простирания будет больше большего, и по простиранию - меньше меньшего из слоев УЭС. Однако, рассчитывая УЭС системы чередования слоев нужно помнить, что для расчета средних продольных и поперечных сопротивлений используются не ρ слоев непосредственно, а связанные с ними S и T слоев.

$$S_1 = h_1 / \rho_1; \quad S_2 = h_2 / \rho_2; \quad S_{\Sigma} = S_1 + S_2;$$

$$\text{откуда } \rho_{||} \text{ или } \rho_T = h_{\Sigma} / S_{\Sigma}.$$

$$T_1 = h_1 \cdot \rho_1; \quad T_2 = h_2 \cdot \rho_2; \quad T_{\Sigma} = T_1 + T_2;$$

$$\text{откуда } \rho_{\perp} \text{ или } \rho_N = T_{\Sigma} / h_{\Sigma}.$$

Полагая, что $h_1 = h_2$, получим

$$\rho_T = 2 \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \quad \text{а } \rho_N = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}.$$

Задав, например $\rho_1 = 1$ Ом·м, и $\rho_2 = 10$ Ом·м, получим $\rho_T \approx 1,9$ Ом·м, и $\rho_N = 5,5$ Ом·м, что отличается от интуитивно ожидаемых значений ρ_N и ρ_T . Коэффициент анизотропии этой модели

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_T}} = \sqrt{\frac{5,5}{1,9}} \approx 1,7,$$

что также кажется подозрительно мало при десятикратном различии УЭС исходных слоев. Неравные мощности слоев еще более усложняют эту картину.

Впервые в истории отечественной электроразведки задача о электрическом поле над однородной анизотропной средой была рассмотрена В.Р.Бурсианом [10], который создал основы теории объемных токов в анизотропных средах и решил задачу о поле точечного источника в неограниченной анизотропной среде. Он пришел к заключению, что для оценки углового падения анизотропных пород, перекрытых наносами, необходимо проводить бурение на глубину, значительно превышающую

мощность верхнего слоя рыхлых отложений для проведения электрических измерений с использованием скважин.

А.П.Краев [27] провел решение данной задачи в самом общем виде: в его постановке все три главные оси тензора проводимости различаются между собой.

А.И.Заборовский рассмотрел задачу определения поля электрического тока около точечного заземления, расположенного на поверхности анизотропной среды (рис.5.1.1). Он привел выражение для потенциала точечного источника в безграничной анизотропной среде и на поверхности земли. Именно в виде, предложенном А.И.Заборовским [20], выражения для поля и потенциала используются большинством исследователей в настоящее время.

В своих работах А.С.Семенов [62-65] отметил, что необходимо отдавать предпочтение установке потенциалов, как наименее чувствительной к влиянию неоднородностей разреза. Вместе с тем он обнаружил высокую чувствительность к анизотропии дипольной экваториальной установки и изучил особенности ее поля, рассматривая установки с бесконечно малыми и конечными линиями. Практические исследования он проводил на территории Крымской учебной практики ЛГУ, изучая анизотропию пород таврической серии на обнажениях под плато Патиль.

Работа И.И.Бреднева и С.С.Сысова [9] посвящена решению задачи о поле точечного источника тока в присутствии

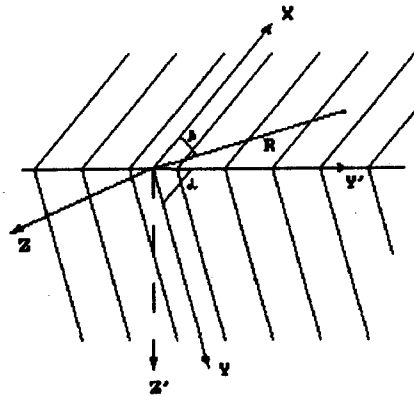


Рис.5.1.1 Система координат над анизотропной средой

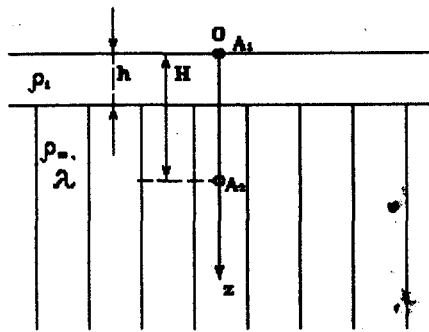


Рис.5.1.2 Модель среды в работе И.И.Бреднева и С.С.Сысова

анизотропной вертикально-слоистой среды, перекрытой слоем изотропных наносов (рис.5.1.2). Авторы решают две задачи: о поле источника тока на поверхности земли и в подстилающей анизотропной среде.

Ю.М.Гуревич и О.В.Сажина [15] рассмотрели задачу об электрическом поле точечного источника тока, погруженного в двухслойное анизотропное полупространство с произвольным падением слоистости в каждом пласте, с одинаковым простиранием (рис.5.1.3). Задача решается авторами для двух случаев: для точечного источника, расположенного в первой среде, и для источника, расположенного во второй среде.

В.А.Шевниным [80] для круговых наблюдений предложена установка, получившая название триполь (Т-установка). Это сочетание установки Амп и двух Г-образных установок. В его работе приводятся результаты экспериментальных расчетов, показывающих преимущество такой установки по сравнению с традиционными. Автор отмечает, что преимущества Т-установки перед дипольной экваториальной становятся особенно заметны при погружении источника тока в скважину.

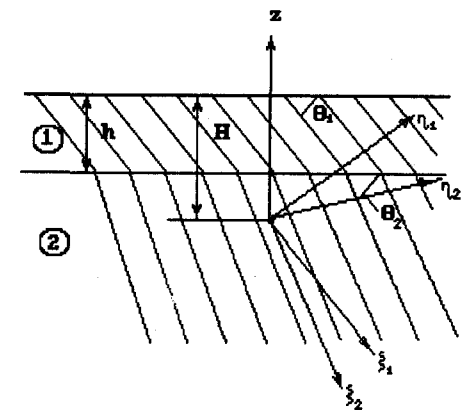


Рис.5.1.3. Модель среды для задачи Ю.М.Гуревича и О.В.Сажинной

5.1. Методика круговых наблюдений в анизотропных средах

Для изучения анизотропных комплексов горных пород применяются круговые электрометрические наблюдения (обычно круговое ЭП (или КЭП), реже круговые зондирования - КВЭЗ).

Формулы для описания проявлений электрической анизотропии в методе сопротивления можно получить из решения задачи о поле точечного источника на поверхности анизотропной среды [10,20]. Рассмотрим основные положения этой задачи. Обозначим истинное УЭС по простиранию анизотропной толщи через ρ_T , а вкрест простирания через ρ_N .

Квадратный корень из отношения ρ_N к ρ_T - это коэффициент анизотропии λ , а корень из их произведения - среднее квадратичное сопротивление ρ_M . Расположим начало системы координат на поверхности земли в точке А, где находится источник тока с силой I . Ось Z направлена вертикально вниз, ось X - по простиранию, а ось Y - вкrest простирания анизотропной среды. Угол падения анизотропной толщи - α , а угол между линией простирания и линией разноса R от электрода А к точке измерения М - β .

Потенциал точечного источника на поверхности анизотропной среды определяется следующей формулой [20]:

$$U = \frac{I \rho_T \sqrt{\rho_N}}{2\pi \sqrt{S_1 + S_2}}, \quad \text{где} \quad (1)$$

$$S_1 = \rho_T (r^2 \cos^2 \beta + r^2 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha + Z^2 \sin^2 \alpha + 2rZ \sin \beta \sin \alpha \cos \alpha),$$

$$S_2 = \rho_N (r^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + Z^2 \cos^2 \alpha - 2rZ \sin \beta \sin \alpha \cos \alpha),$$

где r равно проекции АМ на плоскость ХОУ, Z - глубина источника тока, β - угол между линией простирания и проекции АМ на плоскость ХОУ.

При вертикальном залегании анизотропной толщи ($\alpha = 90^\circ$) потенциал равен:

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

Проводя измерения потенциала установкой АМ в разных азимутах, но с сохранением величины разноса r , например вдоль и вкrest напластования, можно обнаружить, что значения U или ρ_K окажутся различными.

Известно, что изолинии U представляют собой эллипсы, а отношение их полуосей (при $\alpha = 90^\circ$) равно λ , причем длинная ось эллипса ориентирована по простиранию (вдоль оси X).

Значение радиальной составляющей вектора плотности

тока j_R на поверхности земли может быть определено по формуле:

$$j_R = \frac{I \rho_T \sqrt{\rho_N} \cdot \sqrt{X^2 + Y^2}}{2\pi [\rho_T X^2 + \rho_N Y^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (3)$$

На равных удалениях от источника по осям X и Y значения плотности тока составляют:

$$\text{при } X=1, Y=0: j_x = \frac{I \lambda}{2\pi};$$

$$\text{при } X=0, Y=1: j_y = \frac{I}{2\pi \lambda^2},$$

а их отношение будет равно λ^3 , что говорит о преимущественном растекании тока в направлении простирания анизотропной толщи.

Формула для расчета кажущегося сопротивления с установкой АМН может быть приведена к виду:

$$\rho_K = \frac{\rho_{MN} \cdot j_{MN}}{j_0}, \quad (4)$$

где j_0 - плотность тока в однородном изотропном полупространстве, а ρ_{MN} и j_{MN} - УЭС и плотность тока вблизи приемных электродов в реальной среде. При ориентации установки по простиранию:

$$\rho_{MN||} = \rho_T, \quad j_{MN||} = \frac{I \lambda}{2\pi}, \quad j_0 = \frac{I}{2\pi}, \quad \rho_{K||} = \rho_M,$$

а вкrest простирания:

$$\rho_{MN\perp} = \rho_N, \quad j_{MN\perp} = \frac{I}{2\pi \lambda^2}, \quad \rho_{K\perp} = \rho_T.$$

Изменения плотности тока для разных азимутов наблюдений над анизотропным полупространством оказываются сильнее, чем изменения УЭС, поэтому ρ_K и оказываются ориентированными иначе, чем истинные ρ . Таким образом

возникновение парадокса анизотропии можно объяснить за счет преимущественного роста плотности тока по простиранию анизотропной толщи.

Замечание. Если бы каким либо образом удалось в приведенных выше формулах поменять местами сочетания ρ_{MN} и составляющих плотности тока j_{MN} , то отношение осей эллипса анизотропии увеличилось бы до λ^5 . По-видимому нечто подобное и происходит при использовании установок ДЭП и триполь, которые рассматриваются ниже.

ВЫБОР УСТАНОВОК

Вообще говоря, для изучения анизотропии с помощью кругового профилирования можно использовать любые установки метода сопротивлений. Однако хотелось бы добиться сочетания высокой производительности и помехоустойчивости, информативности и устойчивости к воздействию помех. Эти требования в значительной степени являются взаимоисключающими. Наиболее широко при изучении анизотропии применяется круговое ЭП с 4-электродной установкой Шлюмберже, реже - с трехэлектродной AMN. Природные среды отличаются малыми коэффициентами анизотропии (чаще 1.05-1.2, реже 1.5-2 и более), поэтому эффективность круговых ЭП с такими установками невелика. Единственными определяемыми параметрами являются азимут простирания анизотропной толщи и отношение осей эллипса. При вертикальном залегании это отношение равно истинному коэффициенту анизотропии, при наклонном залегании имеет смысл кажущегося - λ_k .

А.С.Семенов [62-65] обратил внимание геофизиков на следующие особенности в изучении анизотропных сред методом сопротивлений. 1. Все установки с ориентацией электродов по одной прямой на поверхности земли (AM, AMN, AMNB, радиальная АВ-MN) дают равнозначную информацию, т.е. идентичные эллипсы кругового профилирования. 2. При заземлении питающих и приемных электродов на поверхности земли нельзя определить направление и угол падения, а только азимут простирания анизотропной толщи. 3. Заземление на глубине дает возможность определить все параметры анизотропии. 4. Дипольная экваториальная установка (ДЭП) обладает существенно большей чувствительностью к анизотропии с отношением осей эллипса для вертикального залегания толщи λ^5 , вместо λ для линейных установок. Формула для расчета ρ_k в случае идеальной установки ДЭП:

$$\rho_k = \frac{\rho_M (A_1 B_1 - 3 C_1^2)}{B_1^{5/2}}, \quad (5)$$

где $A_1 = \sin^2 \beta + B \cos^2 \beta$, $B_1 = \cos^2 \beta + B \sin^2 \beta$,

$$C_1 = (B-1) \sin \beta \cos \beta, \quad B = \cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha.$$

(Здесь угол β - между направлением простирания и разносом R, соединяющем центры диполей АВ и MN). Из формулы 5 можно оценить λ_k . При $\alpha = 90^\circ$, ρ_k по простиранию ($\beta = 0^\circ$) равно: $\rho_k = \rho_M \lambda^2$, а вкрест простирания ($\beta = 90^\circ$): $\rho_k = \rho_M / \lambda^3$ и отношение осей эллипса $\lambda_k = \lambda^5$.

Из работ А.С.Семенова можно сделать вывод, что поиск новых методик изучения анизотропии не следует вести на основе линейных установок; наоборот, нужно обратить внимание на установки, у которых электроды расположены не на одной линии, и на установки с погруженными на глубину питающими электродами.

Для исследования влияния анизотропии авторами были проведены расчеты потенциала U, электрического поля E и кажущегося сопротивления для ряда установок: двухэлектродной потенциал-установки AM, трехэлектродной AMN, идеальной и реальной установок ДЭП и др. Из сопоставления эллипсов анизотропии для установок AM и AMN с установкой ДЭП (рис.5.1.4)



Рис.5.1.4. Зависимости λ_k для AM, ДЭП и T-установки от R/MN

видно основное преимущество установки ДЭП - заметно более высокая чувствительность к анизотропии. Там же показано влияние реальных значений R/AB (при MN=AB) на λ_k установки ДЭП. Установка ДЭП близка к идеальной при R/AB > 5, когда λ_k близко к λ^5 . Для квадратной установки (R/AB=1) λ_k снижается в 2.5 раза,

причем особенно резко после $R/AB < 3$.

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ УСТАНОВКА

При изучении установок аналогичных ДЭП нами предложена другая установка, получившая название триполь (Т - установка) или двухкомпонентная (2-комп.) (рис.5.1.4). Один питающий электрод А располагается на поверхности или в скважине. Измерительная система находится на расстоянии R от А и состоит из трех линий MN, сходящихся в одной точке М и ориентированных по радиусу, проведенному из точки А, и в разные стороны перпендикулярно ему. Это сочетание установки AMN и двух Г-образных установок. В отличие от известной установки метода двух составляющих [7], для Г-образной установки можно вычислить ρ_k . Сочетание двух Г-

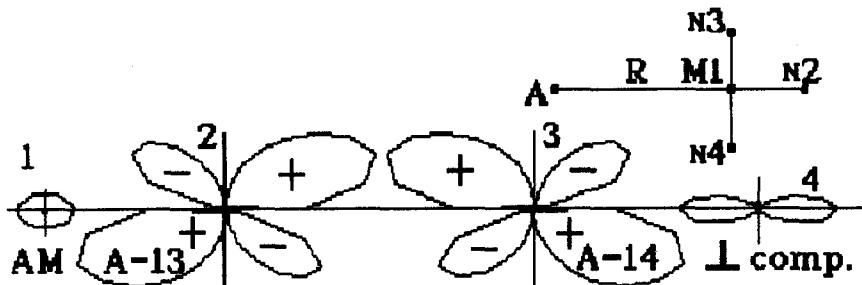


Рис.5.1.5. Эллипсы для разных составляющих Т-установки

образных установок позволяет вычислить среднее значение ρ_k , имеющее точку записи на том же радиусе (азимуте), что и у AMN. Эллипсы анизотропии для каждой из Г-образных установок имеют сложную форму с положительными и отрицательными лепестками и нулевыми значениями по отдельным азимутам, они смещены относительно линии простираения (рис.5.1.5 (2,3)), но среднее ρ_k Т-установки (рис.5.1.5(4)) не сме-

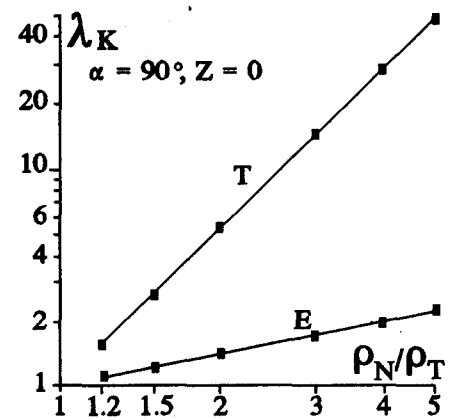


Рис.5.1.6 Зависимость λ_k от ρ_N / ρ_T

щено. Необходимо отметить, что такой эллипс, как на рис.5.1.5(4) может быть получен лишь при учете знаков составляющих его двух компонент. Без учета знака эллипсы для Т-установки и все зависимости, полученные для нее будут иными. Легко показать, что среднее ρ_k Т-установки эквивалентно по чувствительности к анизотропии ρ_k установки ДЭП (рис.5.1.4). Действительно, установка ДЭП - это комбинация двух Г-образных установок (AM-MN и BN-NM), и Т-установка - аналогичная комбинация (AM_MN3 и AM_MN4). В ДЭП сложение полей двух Г-установок происходит в момент измерения, а в Т - путем расчета. Уровень сигнала в Т-установке вдвое слабее, чем в ДЭП (один питающий электрод вместо двух). Геометрический коэффициент рассчитывается аналогично. Для идеальных установок:

$$K_{дэп} = 2\pi \frac{R^3}{AB \cdot MN}, \quad K_T = 4\pi \frac{R^3}{MN^2}, \quad (6)$$

а для реальной Т-установки:

$$K_T = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN}} \quad (7)$$

Как и установка ДЭП, Т-установка дает λ_k пропорциональное λ^5 (при R/AB или $R/MN > 5$) (рис.5.1.4-5.1.8), т.е. значительно чувствительнее традиционных установок. Поэтому в тех случаях, когда для AM или AMN эллипс уже не отличается от круга, Т-установка еще сохраняет заметную эллиптич-

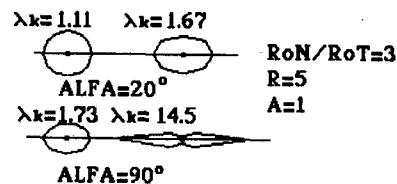


Рис.5.1.7 Эллипсы анизотропии для E и Т компонент при $\alpha=90$ и 20°

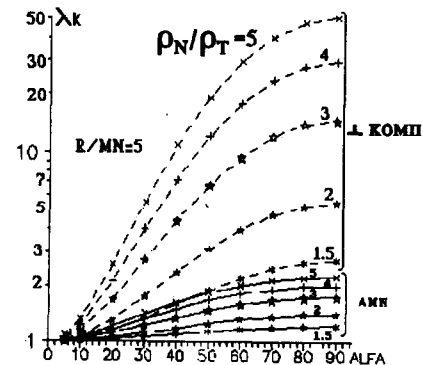


Рис.5.1.8 Зависимости λ_k от α и λ для E и Т составляющих при $Z=0$

ность круговой диаграммы (рис. 5.1.7). Отношения осей эллипса анизотропии (или λ_k) традиционных (AMN) и Т-установки зависят от многих условий наблюдений и среды: отношения R/MN (рис.5.1.4), истинного λ (рис.5.1.6), угла наклона анизотропной толщи (рис.5.1.8).

Круговые наблюдения с погруженным источником

Преимущества Т-установки перед дипольной экваториальной становятся заметны при погружении источника тока в скважину, т.к. точечный источник опустить в скважину проще. Для погруженного источника эллипсы кругового профилирования становятся асимметричными для установок АМ (для краткости - U), AMN (для краткости - E) и 2-компонентной (Т). Эта асимметрия может быть выражена в виде отношения b/c , где b - значение ρ_k по восстанию, а c - по падению толщи. В силу асимметрии эллипсов меняется величина λ_k - отношение ширины эллипса по простиранию ($2a$) к ширине вкrest простирания ($b+c$), которое, строго говоря, не всегда есть отношение большой к малой оси (см. рис. 5.1.11, 5.1.13).

На рис. 5.1.9 показана зависимость λ_k , а на рис. 5.1.10 - b/c для U, E и T компонент от угла падения анизотропной толщи для случая, когда питающий электрод опущен в скважину. Интересно отметить, что в этих случаях U и E компоненты ведут себя по разному, тогда как при заземлении А на поверхности они проявляли себя одинаково. Если λ_k для E и U с ростом α от 0° до 90° возрастает монотонно, то для E на рис.5.1.9 видна область инверсии (при α от 10° до 40°). Графики отношения b/c , в отличие от λ_k имеют экстремальный характер с максимумами при $\alpha=30^\circ-40^\circ$ (рис. 5.1.10).

Изменения в эллипсах анизотропии для U, E и T составляющих, происходящие при погружении источника тока (с ростом Z/R) показаны на рис. 5.1.11 и 5.1.12.

На рис. 5.1.11 представлены зависимости λ_k от Z/R . При Z/R от 0.02 до 0.5 λ_k сначала меняется слабо, а потом более заметно. Т - компонента по величине λ_k заметно выше U и

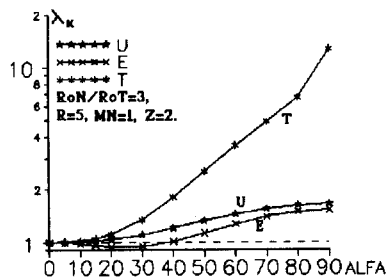


Рис.5.1.9. Зависимость λ_k для U, E и T от угла α

E. Величины λ_k для U и E при $Z/R < 0.1$ практически не различаются. С ростом Z/R λ_k для U убывает монотонно, а λ_k для E испытывает инверсию, особенно сильную при $Z/R = 1$. При инверсии ось эллипса по простиранию оказывается короче оси эллипса вкrest простирания (нет парадокса анизотропии), что проявляется при Z/R от 0.6 до 2.5. При больших Z/R парадокс анизотропии восстанавливается и λ_k возрастает до 1.6. Для Т - компоненты λ_k после резкого убывания становится меньше 1, т.е. также отмечается инверсия, хотя и менее выраженная, чем для E, затем с ростом Z/R λ_k асимптотически приближается к 1 снизу.

На рис.5.1.12 показаны изменения в соотношении полуосей эллипса b и c (для азимутов 90° и 270° , по восстанию и падению толщи) в зависимости от Z/R . Эта асимметрия эллипса характеризует чувствительность компонент поля к углу наклона погруженного на глубину источника тока. В случае источника на поверхности (или при $Z/R < 0.05$) эта асимметрия отсутствует. Компоненты U и T ведут себя сходным образом, хотя и различаются по чувствительности. Отношение b/c стремится к 1 для малых и больших Z/R и максимально при $Z/R=1$. Компонента E ведет себя совершенно иначе. Она возрастает от 1 до максимума с ростом Z/R от 0.02 до 0.6, но когда Z/R становится > 1 , начинает резко /бывать, и становится не только

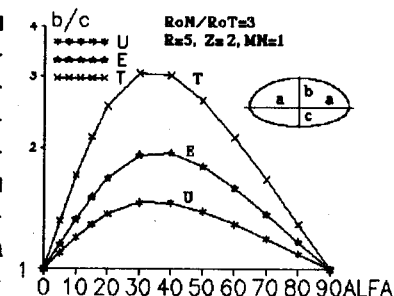


Рис.5.1.10. Зависимость b/c от угла α для U, E и T компонент

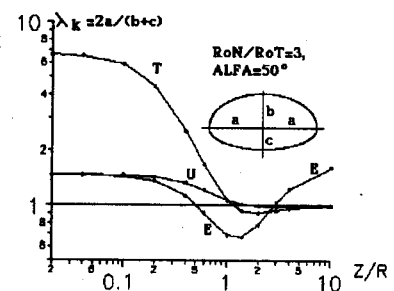


Рис.5.1.11. Зависимость λ_k от глубины Z/R источника тока

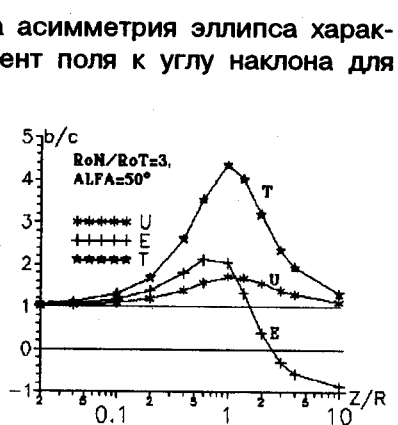


Рис.5.1.12. Зависимость b/c от глубины Z/R источника тока

меньше 1, но и 0. Это соответствует эллипсу для которого значения ρ_k в части азимутов положительны, а в другой части отрицательны (рис.5.1.13,С). Данная особенность может быть выявлена только при измерениях на постоянном токе с контролем полярности сигналов, без контроля полярности получится диаграмма, как на рис.5.1.13,Д. Фактически это означает, что эллипс ρ_k , построенный вокруг центра вращения не только асимметричен, относительно этого центра, но и не включает его в свой контур (рис.5.1.13,С). Номограммы на рис.5.1.14-5.1.15 иллюстрируют один из возможных способов оценки параметров анизотропии по наблюдениям с погруженным питающим электродом. По осям номограмм отложены значения λ_k (отношение осей эллипса по простиранию и падению) и b/c (отношение ρ_k для азимутов 90° и 270° - по восстанию и падению анизотропной толщи). Эти значения определяются по результатам круговых наблюдений. Выходными параметрами, определяемыми по номограмме являются угол падения α и истинный коэффициент анизотропии, точнее

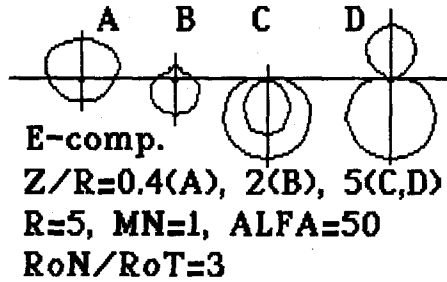


Рис.5.1.13. Эллипсы для E - компоненты при разных Z/R

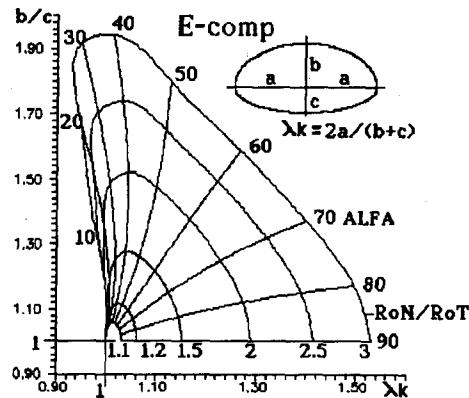


Рис.5.1.14. Номограмма для оценки анизотропии по E-компоненте

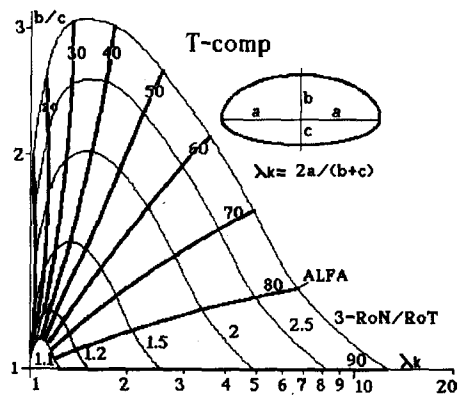


Рис.5.1.15. Номограмма для оценки анизотропии по T-компоненте

$\lambda^2 = \rho_N / \rho_T$. Данные номограммы построены для отношения $Z/R=0.4$. Для других отношений Z/R , особенно < 0.1 и > 1 вид номограмм может существенно измениться. Это означает, что значение Z/R должно контролироваться. Рис.5.1.14 соответствует E-компоненте, а рис.5.1.15 - T-компоненте. Амплитуда изменений λ_k и b/c для T заметно выше (λ_k от 1 до 12.6 для T и от 0.93 до 1.53 для E, и b/c от 1 до 3 для T и от 1 до 1.95 для E), поэтому для T взят логарифмический масштаб, а для E - линейный.

На обоих рисунках разрешающая способность к углам наклона слабо убывает для углов от 90° до 30° и резко снижается для углов меньше 30° . Разрешающая способность растет с ростом отношения ρ_N / ρ_T . Номографическая форма оценки параметров нам кажется в данном случае предпочтительной в силу простоты использования и наглядности. Пользование аналитическими расчетными

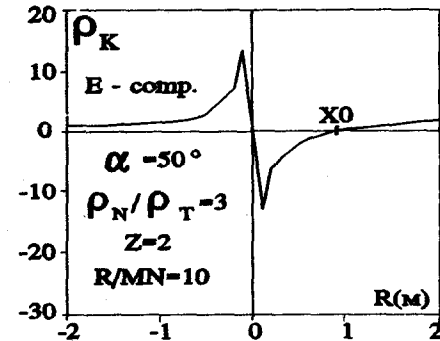


Рис.5.1.16. Изменения ρ_k для E-компоненты по линии вкрест простирания

формулами неизбежно окажется более громоздким. Еще одна возможность оценки угла падения видна на рис. 5.1.12 и отдельно представлена на рис.5.1.16, где показаны графики ρ_k для азимутов 90° (по восстанию (справа от 0)) и 270° (по падению (слева от 0)) анизотропной толщи для угла падения $\alpha=50^\circ$, $\rho_N / \rho_T=3$ для компоненты E. Отличительной особенностью E-компоненты являются отрицательные значения ρ_k по восстанию толщи, сменяющиеся на положительные при дальнейшем удалении от А. Смена знака ρ_k понятна. За счет анизотропии происходит смещение максимума потенциала от точки $X=0$ в точку $X=X_0$ в направлении восстания. В точке X_0 равен нулю градиент потенциала, причем при удалении от начала координат до X_0 растут значения потенциала и значения ρ_k установки AMN - отрицательны. Точное положение точки X_0 для идеальной AMN(E) определяется формулой [27]:

$$X_0 = 1522$$

$$X_0 = Z \cdot \frac{C}{B}, \text{ где}$$

$$C = \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot (\lambda^2 - 1),$$

$$B = \cos^2 \alpha + \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha.$$

Для оценки угла падения α , эту формулу полезно номографировать.

Выводы

1. Для повышения чувствительности кругового ЭП к анизотропии рекомендуется вместо установок АМ, АМN, АМNB применять дипольную экваториальную или двухкомпонентную Т-установку. Последняя эквивалентна ДЭП по чувствительности и позволяет работать с заземленным на глубине источником тока.

2. Наблюдения с погруженным на глубину Z питающим электродом позволяют определить все параметры анизотропной толщи.

3. Методика наблюдений представляется в следующем виде: а) для оценки направления простирания анизотропной толщи используется наземная ДЭП или Т - установка, обладающие максимальной чувствительностью к анизотропии; б) для оценки направления падения и других параметров анизотропии (α , λ) требуются наблюдения с погруженным питающим электродом. Здесь желательны измерение E и T составляющих при нескольких значениях Z/R (рекомендуется $Z/R=0.4$); в) для оценки параметров анизотропии можно использовать номограммы, типа представленных на рис.5.1.14-5.1.15; г) дополнительную оценку α можно получить, измеряя E -компоненту по линии восстания и определяя точку X_0 смены знака ρ_k (рис.5.1.16).

5.2. Электрические зондирования над анизотропной средой, перекрытой слоем наносов

Введение. Подобная задача в теоретическом плане является более общей, чем задача о поле над анизотропным полупространством и весьма важной в практическом отношении. Авторы настоящей работы в ходе полевых работ на Чукотке в районе г.Билибино, в г.Донецке, на территории Крымской учебной геофизической практики и в других местах

сталкивались с подобными ситуациями. Для обеспечения научно-производственных и учебных полевых исследований возникла потребность в создании программного обеспечения для электрических наблюдений над анизотропным полупространством с наносами. В литературе известны решения этой задачи [9,15,25]. Зная об этих работах мы все же предприняли свою попытку решения задачи. При этом преследовались такие цели: 1) нужны алгоритмы для разных установок; 2) конечные расчетные формулы должны сохранить ясную структуру и четкий физический смысл; 3) сведение расчетных формул к виду интегралов Ханкеля может позволить применить для их расчета метод линейной фильтрации; 4) формулы должны быть удобны для решения обратной задачи.

Наиболее общей постановкой слоистой анизотропной задачи можно считать горизонтально-слоистую модель с произвольно-ориентированной анизотропией в каждом слое. Мы рассматриваем более частный случай: анизотропное основание с вертикальной ориентировкой анизотропии и изотропные наносы, как в работе [9].

Модель среды. Верхний слой имеет сопротивление ρ_1 и мощность H , анизотропное полупространство: продольное сопротивление ρ_T и поперечное ρ_N , коэффициент анизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_N / \rho_T}$, среднее квадратичное сопротивление $\rho_M = \sqrt{\rho_N \cdot \rho_T}$ и угол падения анизотропной толщи 90° . Ось X направлена вкрас простирания анизотропной толщи, а ось Y - по простиранию, ось Z - вертикально вниз. Начало координат в точке источника A , расположенном на поверхности земли. Приемные электроды (M или MN) тоже на поверхности. Необходимо найти значения потенциала U и напряженности поля E на поверхности земли.

Решение задачи. Общий ход решения следующий: исходное уравнение Лапласа, переход для решения в спектральную область, решение на уровне спектров, содержащее неопределенные коэффициенты, определение коэффициентов из граничных условий, обратное преобразование из спектральной в действительную область, преобразование формул к виду, удобному для численных расчетов.

Потенциал в верхнем слое U_1 можно определить из решения уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

$$U_1 = U_0 + U, \quad (9)$$

где электрический потенциал в первом слое U_1 можно представить в виде суммы нормального потенциала U_0 первичного точечного источника для однородного полупространства с сопротивлением ρ_1 и аномального потенциала U .

В нижнем анизотропном полупространстве потенциал подчиняется уравнению Лапласа вида:

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial z^2} = 0, \quad (10)$$

где $\alpha^2 = \rho_i / \rho_n = 1/\lambda^2$.

Граничные условия имеют следующий вид:

$$U_1 = U_2, \quad \text{при } z = H; \quad (11)$$

$$j_{1z} = j_{2z} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial z} = \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_2}{\partial z}, \quad \text{при } z = H; \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial z} = 0, \quad \text{при } z = 0. \quad (13)$$

Физические условия на источнике и бесконечности можно записать следующим образом:

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} U_1 = \infty; \quad \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} U_1 = 0; \quad \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ z \rightarrow \infty}} U_2 = 0. \quad (14)$$

Переход в спектральную область. Для решения используем двойное преобразование Фурье:

$$\bar{U} = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} U \cdot \cos(k_x, x) \cdot \cos(k_y, y) dx, dy,$$

$$U = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{U} \cdot \cos(k_x, x) \cdot \cos(k_y, y) dk_x, dk_y.$$

Запишем спектральные потенциалы (\bar{U}_1, \bar{U}_2) и их вертикальные производные в первой и второй среде в виде:

$$\bar{U}_1(k_x, k_y) = A_1(k_x, k_y) e^{zk_1} + B_1(k_x, k_y) e^{-zk_1} + \bar{U}_1^0, \quad (15)$$

где $k_1 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$;

$$\bar{U}_2(k_x, k_y) = B_2(k_x, k_y) e^{-zk_2}, \quad \text{где } k_2 = \sqrt{(\alpha k_x)^2 + k_y^2}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_1(k_x, k_y)}{\partial z} = k_1 A_1 e^{zk_1} - k_1 B_1 e^{-zk_1} - k_1 \frac{\rho_1}{2\pi k_1} \cdot e^{-zk_1}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_2(k_x, k_y)}{\partial z} = -k_2 B_2 e^{-zk_2}. \quad (18)$$

Коэффициенты A_1, B_1 и B_2 найдем из граничных условий для $z=0$ и $z=H$. Для $z=0$ получаем, что $A_1 = B_1$. Обозначив $k_1/k_2 = \gamma$ получаем аналог коэффициента отражения

$$\bar{K}(k_x, k_y) = \frac{\gamma \rho_i - \rho_1}{\gamma \rho_i + \rho_1}$$

и с его помощью выразим A_1 :

$$A_1(k_x, k_y) = \frac{\bar{K} e^{-2k_1 H}}{1 - \bar{K} e^{-2k_1 H}}. \quad (19)$$

Таким образом:

$$\bar{U}_1(k_x, k_y) = \frac{l\rho_1}{2\pi k_1} A_1 (\theta^{k_1 z} + \theta^{-k_1 z}) + \bar{U}_0(k_x, k_y). \quad (20)$$

Обратное преобразование Фурье. После обратного преобразования спектрального решения, полагая $z=0$, получим:

$$U_1 = \frac{l\rho_1}{2\pi\Gamma} \left[1 + \frac{\Gamma}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2A_1}{k_1} \cos(k_x x) \cos(k_y y) dk_x dk_y \right]. \quad (21)$$

Перейдем к полярной системе координат, обозначив:

$$k_x = k_r \cdot \cos k_\varphi, \quad k_y = k_r \cdot \sin k_\varphi, \quad dk_x dk_y = k_r \cdot dk_r \cdot dk_\varphi, \quad (22)$$

$$k_1 = k_r, \quad k_2 = k_r \cdot \sqrt{\alpha^2 \cos^2 k_\varphi + \sin^2 k_\varphi}.$$

$$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}; \quad k_\varphi = \arctg \frac{k_y}{k_x};$$

$$\gamma(k_\varphi) = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 \cos^2 k_\varphi + \sin^2 k_\varphi}},$$

$$\bar{K} = \bar{K}(k_\varphi), \quad (23)$$

$$U_1(r, \varphi, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi\Gamma} \left[1 + \frac{\Gamma}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} A_1 \cos(k_r r \cdot \cos(k_\varphi - \varphi)) dk_r dk_\varphi \right]. \quad (24)$$

Первый предельный переход. Рассмотрим предельный случай перехода к изотропному основанию:

$$\gamma=1; \quad \bar{K} = K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}; \quad (25)$$

$$U_1(r, \varphi, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi\Gamma} \times \quad (26)$$

$$\times \left[1 + 2\Gamma \int_0^{\infty} \frac{K\theta^{-2k_r H}}{1 - K\theta^{-2k_r H}} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(k_r r \cdot \cos(k_\varphi - \varphi)) dk_\varphi \right) dk_r \right].$$

Интеграл в круглых скобках (по φ) - это функция Бесселя $J_0(k_r r)$. Таким образом, окончательная формула имеет вид:

$$U_1 = U_1(r) = \frac{l\rho_1}{2\pi\Gamma} \left[1 + 2\Gamma \int_0^{\infty} \frac{K\theta^{-2k_r H}}{1 - K\theta^{-2k_r H}} \cdot J_0(k_r r) dk_r \right]. \quad (27)$$

Мы получили известное решение для изотропного основания, что говорит о вероятной правильности общего решения (24).

Продолжение преобразований для двухслойной анизотропной модели.

Введем замену:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \bar{\varphi}; \quad \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = -\sin(\varphi).$$

Получим:

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi\Gamma} \left[1 + \frac{\Gamma}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} A_1(k_r, k_\varphi) \cdot \cos(k_r r \sin(\bar{\varphi} - k_\varphi)) dk_\varphi dk_r \right].$$

Воспользуемся тождеством:

$$\cos(x \cdot \sin t) = J_0(x) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(x) \cdot \cos(2nt), \quad (28)$$

тогда

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \left[1 + \frac{r}{\pi} \int_0^{\bar{\varphi}} \left(J_0(k_r, r) \int_0^{2\pi} A_1(k_r, k_\varphi) dk_\varphi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(k_r, r) \int_0^{2\pi} A_1(k_r, k_\varphi) \cdot \cos(2n(\bar{\varphi} - k_\varphi)) dk_\varphi \right) dk_r \right]; \quad (29)$$

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \left[1 + \frac{r}{\pi} \int_0^{\bar{\varphi}} \left(J_0(k_r, r) \int_{-\pi}^{\pi} A_1(k_r, k_\varphi) dk_\varphi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(k_r, r) \cos(2n\bar{\varphi}) \int_{-\pi}^{\pi} A_1(k_r, k_\varphi) \cos(2nk_\varphi) dk_\varphi \right) dk_r \right]. \quad (30)$$

Обозначим

$$B_{2n}(k_r) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} A_1(k_r, k_\varphi) \cos(2nk_\varphi); \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (31)$$

Тогда

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \left[1 + r \int_0^{\bar{\varphi}} \left(J_0(k_r, r) B_0(k_r) dk_r + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\bar{\varphi}} J_{2n}(k_r, r) B_{2n}(k_r) dk_r \cdot \cos(2n\bar{\varphi}) \right) \right]. \quad (32)$$

Второй предельный переход. Рассмотрим предельный случай перехода к анизотропному основанию. Для этого положим в формуле (32) мощность первого слоя $H \rightarrow 0$. Тогда

$$A_1 = \frac{\bar{K}}{1-K}, \quad B_{2n}(k_r) = B_{2n} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\bar{\varphi}} \frac{\bar{K}}{1-K} \cdot \cos(2nk_\varphi) dk_\varphi.$$

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \left[1 + \frac{1}{2} B_0 \int_0^{\bar{\varphi}} J_0(k_r, r) dk_r + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_{2n} \left(\int_0^{\bar{\varphi}} J_{2n}(k_r, r) dk_r \right) \cos(2n\bar{\varphi}) \right].$$

Интегралы берутся в явном виде,

$$\int_0^{\bar{\varphi}} J_0(k_r, r) \cdot dk_r = \frac{1}{r}, \quad \int_0^{\bar{\varphi}} J_{2n}(k_r, r) \cdot dk_r = \frac{1}{r},$$

$$\text{а } \frac{1}{2} B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_{2n} \cdot \cos(2n\bar{\varphi}) = A_1(\bar{\varphi}).$$

Тогда

$$U = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \left[1 + \frac{\bar{K}}{1-K} \right] = \frac{l\rho_1}{2\pi r} \frac{1}{1-K} = \frac{l\rho_t}{2\pi r \cdot \sqrt{\alpha^2 \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}},$$

что совпадает с известным решением для анизотропного полупространства.

Продолжение преобразований для двухслойной анизотропной модели.

Заменим k_r на $k_r^* = k_r \cdot r$. Тогда $k_r = k_r^* / r$ и $dk_r = dk_r^* / r$ и из выражения (16) получим:

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \quad (33)$$

$$+ 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} J_{2n}(k_r) B_{2n} \left(\frac{k_r}{r} \right) dk_r \right] \cos(2n\bar{\varphi}) .$$

$$= \frac{I\rho_1}{2\pi r} \left[1 + \int_0^{\infty} J_0(k_r) B_0 \left(\frac{k_r}{r} \right) dk_r + \right.$$

$$\rho_k(r, \bar{\varphi}, 0) = \quad (34)$$

$$= \rho_1 \left[1 + \int_0^{\infty} J_0(k_r) B_0 \left(\frac{k_r}{r} \right) dk_r + \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} J_{2n}(k_r) B_{2n} \left(\frac{k_r}{r} \right) dk_r \right] \cos(2n\bar{\varphi}) \right]$$

и основную расчетную формулу ρ_k для потенциал-установки:

$$\rho_k(r, \bar{\varphi}, 0) = \rho_1 \left[C_0(H/r) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n(H/r) \cos(2n\bar{\varphi}) \right], \quad (35)$$

$$\text{где } C_0(x) = 1 + \int_0^{\infty} J_0(k_r) B_0(k_r x) dk_r,$$

$$C_n(x) = 2 \int_0^{\infty} J_{2n}(k_r) B_{2n}(k_r x) dk_r.$$

Особенностями расчетной формулы (35) являются независимость B_0 и вследствие этого C_0 от угла ориентации установки $\bar{\varphi}$, что позволяет предположить связь этого коэффициента с влиянием слоисто-изотропной составляющей разреза. Наоборот, зависимость других членов ряда от угла $\bar{\varphi}$ подчеркивает их связь с анизотропией основания разреза. При этом влияние угла ориентации установки сосредоточено в $\cos(2n\bar{\varphi})$, расчет которых может проводиться отдельно от более трудоемких расчетов коэффициентов C , что позволяет, после расчета C легко получить ρ_k для любого азимута установки.

Важным вопросом является число членов ряда в формуле (35). Дополнительными исследованиями установлено, что гармоники C_n убывают быстро и с достаточной для практики точностью можно ограничиться пятью первыми гармониками ($n=0...4$).

Выражения для компонент поля. Преобразуем формулу (32) для U в выражения для компонент поля E_R и E_φ :

$$E_r(r, \bar{\varphi}, 0) = - \frac{\partial}{\partial r} U(r, \bar{\varphi}, 0) =$$

$$= \frac{I\rho_1}{2\pi r^2} \left[1 - r^2 \int_0^{\infty} k_r J_0'(k_r r) B_0(k_r) dk_r - \right.$$

$$\left. - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^{\infty} k_r J_{2n}'(k_r r) B_{2n}(k_r) dk_r \right] \cos(2n\bar{\varphi}) \right].$$

$$E_\varphi = - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{I\rho_1}{2\pi r} \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} J_{2n}(k_r r) B_{2n}(k_r) dk_r \right] \cdot \sin(2n\bar{\varphi}) \cdot 2n.$$

Отметим особенности формулы для E_φ компоненты. Нулевая гармоника (B_0), не зависящая от анизотропии, в ней отсутствует, а влияют только гармоники B_n для $n=1, 2, \dots$, подчеркивающие влияние анизотропии среды. При ориентации установки строго по (или вкрест) простиранию анизотропной толщи E_φ равна нулю, и не равна нулю при отклонении установки от этих азимутов. Секрет высокой чувствительности установок ДЭП и триполь к анизотропии среды заключен в том, что обе

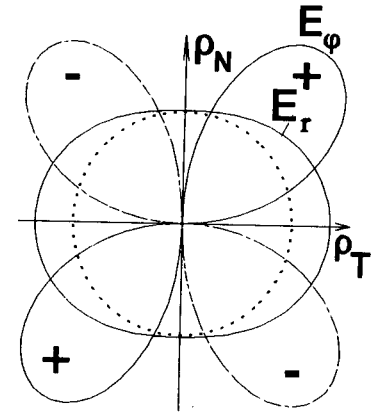


Рис.5.2.1. Радиальная и азимутальная компоненты поля включают в себя по две элементарные Γ -установки, поэтому даже при ориентации установок вдоль и поперек простирания приемные электроды отходят в сторону от оси установки и обеспечивают влияние E_φ компоненты. Соотношение форм этих компонент в зависимости от азимута установки видно на рис.5.2.1. Соотношение амплитуд E_r/E_φ меняется с разносом. Например, для модели

рис.5.2.3,А это отношение около 170 на разnose 1 м и 1.5 на разnose 100 м. На малых разносах влияние анизотропного основания мало и преобладает влияние слоистой среды и прежде всего первого слоя. С ростом разноса возрастает влияние анизотропии и азимутальной компоненты, поэтому отношение E_r/E_ϕ быстро уменьшается.

Результаты расчетов для потенциал (AM)- и градиент (AMN)-установок

На рис.5.2.2,А поведение кривых λ_k отличается тем, что

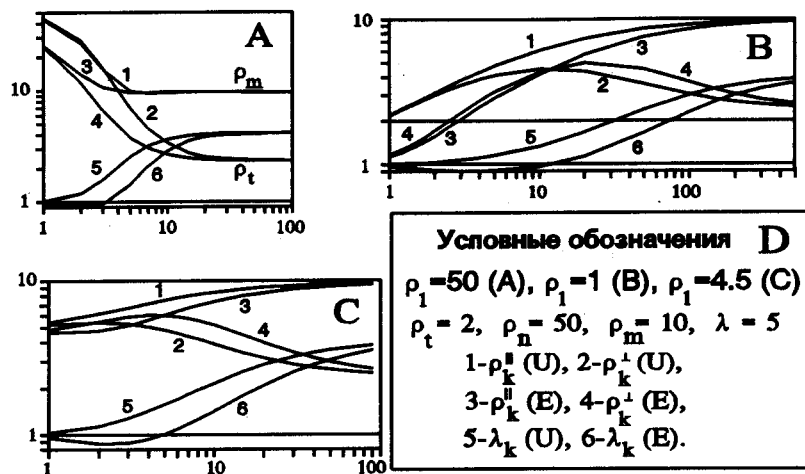


Рис.5.2.2. Кривые зондирования AM и AMN над анизотропной средой с наносами

для потенциал установки значение λ_k монотонно возрастает от 1 до $\lambda_{\text{ИСТ}}$, а для градиент установки проходит через область слабого минимума, где $\lambda_k < 1$ (в интервале разносов 1-3 м).

На рис.5.2.2(А,В,С) приведены результаты расчетов кривых ВЭЗ для потенциал (U) и градиент (E) установок и графики кажущихся коэффициентов анизотропии (λ) над моделями разрезов, параметры которых указаны на рис.5.2.2,Д. Рассмотрены три случая, когда сопротивления анизотропной среды ρ_t и ρ_m меньше ρ_1 (А), больше ρ_1 (В) и когда $\rho_t < \rho_1 < \rho_m$ (С). В целом кривые ρ_k для потенциал (U) и градиент (E) установок ведут себя сходным образом, начинаясь от значения ρ_1 слева

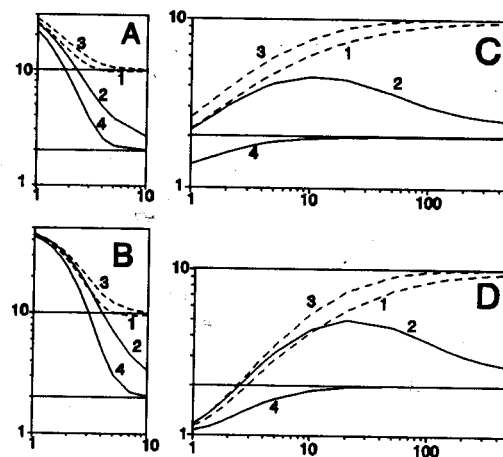


Рис.5.2.3. Сравнение анизотропных и изотропных кривых ВЭЗ

и выходя к значениям ρ_m для поперечной и ρ_t для продольной ориентации установок справа. Сдвиг кривых по оси разносов в области перехода от первого ко второму слою связан с разной глубиной потенциал- и градиент-установок.

На рис.5.2.2,А поведение кривых λ_k отличается тем, что для потенциал установки значение λ_k монотонно возрастает от 1 до $\lambda_{\text{ИСТ}}$, а для градиент установки проходит через область слабого минимума, где $\lambda_k < 1$ (в интервале разносов 1-3 м).

Замечание. Пытаясь сравнить свои расчеты с результатами других авторов, мы испытывали определенные затруднения от отсутствия цифровых таблиц, т.к. рисунки плохо подходят для сопоставления результатов. Поэтому помещаем краткую таблицу с расчетами для рис.5.2.2,А.

AB/2	$\rho_k^{\parallel}(U)$	$\rho_k^{\perp}(U)$	$\lambda_k(U)$	$\rho_k^{\parallel}(E)$	$\rho_k^{\perp}(E)$	$\lambda_k(E)$
1	25.23	24.75	1.02	43.45	44.20	0.98
2	14.01	11.80	1.18	26.23	27.86	0.94
5	9.67	3.77	2.56	9.89	6.89	1.44
10	9.72	2.65	3.67	9.68	3.36	2.88
20	9.71	2.40	4.04	9.75	2.54	3.84
50	9.69	2.35	2.35	9.70	2.37	4.09
100	9.69	2.33	2.33	9.69	2.35	4.13

На рис.5.2.2,В кривые ρ_k для продольных и поперечных установок обнаруживают более заметные различия. Продольные кривые выходят к значению ρ_m снизу, а поперечные - к значению ρ_T сверху, при этом первые являются двухслойными по форме, а вторые - трехслойными типа К. На графике λ_k для градиент-установки заметен широкий минимум в интервале разносов от 1 до 10 r/h, где парадокс анизотропии отсутствует.

Кривые ρ_k для продольных и поперечных зондирований на рис.5.2.2,С различаются еще более резко, чем в предыдущем случае. Продольные кривые являются монотонно восходящими двухслойными, а поперечные - нисходящей двухслойной для потенциал-установки и трехслойной типа К для градиент-установки. График λ_k для градиент-установки также имеет минимум с $\lambda_k < 1$ в области малых r/h < 5.

Сравнение кривых ВЭЗ для анизотропной и изотропной моделей

На рис. 5.2.3 можно видеть поведение кривых ρ_k (U и E) для анизотропной слоистой модели (1,2) в сравнении с изотропной слоистой моделью (3,4). Значение $\rho_1=50$ Ом.м на рис.(А,В) и $\rho_1=1$ Ом.м на рис.(С,Д); $\rho_2=10$ (кр.3) или $\rho_2=2$ (кр.4), а для анизотропного основания $\rho_t=2$, $\rho_n=50$, $\rho_m=10$, $\lambda=5$. Для нисходящих кривых ρ_k (U и E) рис.А,В изотропные и анизотропные U и E кривые ведут себя похоже, при этом продольные анизотропные кривые (1) раньше выходят к асимптоте 10 Омм, чем изотропные, а поперечные анизотропные кривые (2) выходят к асимптоте 2 Омм позже, чем изотропные. Для модели с $\rho_1=1$ Омм (рис.С,Д) продольные анизотропные кривые позже выходят к асимптоте 10 Ом.м, чем изотропные, а поперечные анизотропные кривые имеют форму трехслойных типа К, совершенно отличную от восходящих изотропных кривых и, естественно, приближаются к асимптоте 2 Ом.м намного позже изотропных.

Результаты расчетов для дипольной экваториальной установки

На рис.5.2.4 приведены результаты расчетов продольных и поперечных кривых ВЭЗ и графиков кажущейся анизотропии для дипольной экваториальной установки над анизотропным полупространством с $\rho_T=1$ и $\rho_N=2$ и разными сопротивлениями верхнего слоя: 10 (А), 0,1 (В) и 0,8 Омм (С). Выбор трех моделей аналогичен описанному ранее для потенциал- и градиент-

ент-установок (рис.5.2.2), но значение коэффициента анизотропии уменьшено. Для сравнения для каждой модели приведены графики кажущейся анизотропии для потенциал-установки. Дипольная экваториальная установка, как было показано в разделе 5.1, обладает существенно большей чувствительностью к анизотропии, достигающей в пределе λ^5 , по сравнению с линейными установками (АМ, АМN). Соотношение сопротивлений наносов и нижнего полупространства существенно влияет на форму кривых зондирования и на выход этих кривых к асимптотическим значениям. При мощности первого слоя в 1 м, выход на асимптоту в случае (А) можно отметить при $r>10$, в случае (С) он отмечается при $r=100$, а в случае (В) при $r > 200$.

Номера на кривых Рис.5.2.4. Результаты расчетов для рис.5.2.4(А-С) соответствуют: установки ДЭЗ

1 - продольной и 2 - поперечной кривой зондирования, 3 - кажущейся анизотропии для ДЭЗ, 4 - кажущейся анизотропии для установки АМ. На графиках кажущейся анизотропии для ДЭЗ (3) не отмечены случаи нарушения парадокса анизотропии, в отличие от градиент-установки АМN. Для случаев В и С поперечные кривые зондирования (2) над двухслойной средой имеют вид трехслойных, особенно в случае В. $\rho_1=50$, $H=1$, $\rho_T=2$, $\rho_N=50$, $\rho_m=10$, $\lambda=5$

На рис.5.2.5 и 5.2.6 показаны круговые диаграммы для установок АМ или U (1), АМN или E (2) и ДЭП или Т (3), для двух моделей: 1 и 3 с

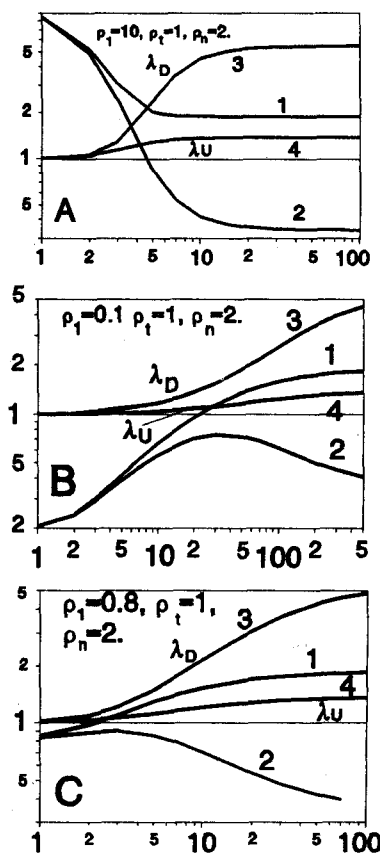


рис.5.2.2 и нескольких разносов r , значения которых указаны на каждом рисунке. Горизонтальный отрезок, выходящий из центра каждой диаграммы вправо (по направлению простирания) приведен для масштаба, его длина равна 10 Ом.

На рис.5.2.5-5.2.6,А для $r=1$ м диаграммы КЭП близки к окружностям. Диаграммы для Е и D установок практически совпадают, а для U отличаются по радиусу в силу разной глубинности потенциал и градиент установок.

На рис.5.2.5-5.2.6,В показаны диаграммы КЭП для переходного состояния от первого ко второму слою, когда круговые диаграммы для трех установок уже заметно отличаются друг от друга.

На рис.5.2.5,В диаграмма для Е почти идеальная окружность, т.к. если посмотреть на рис.5.2.2,А, видно что на разносе 3 м график λ_k как раз пересекает ось $\lambda_k=1$. При этом диаграммы для U и D показывают заметную кажущуюся анизотропию. Так как асимптотическое значение ρ_k^{\parallel} для U и Е установок 10 Ом.м, то по кривой 1 (рис.5.2.2,А) видно, что ρ_k для установки АМ близко к правой асимптоте (потенциал-установка имеет наибольшую глубинность).

На рис.5.2.6,В диаграмма для Е вытянута вкрест простирания, а для U и D - по простиранию, хотя вытянутость эллипса для U практически незаметна.

На рис.5.2.5-5.2.6,С все три диаграммы показывают заметную вытянутость, существенно более резкую для D-установки, и сходную для установок U и Е. Интересно отметить, что в этом случае λ_k для U установки выше, чем для Е при близких или равных ρ_k^{\parallel} за счет заниженных ρ_k^{\perp} для U установки.

При дальнейшем росте разносов качественно картина не меняется, а происходят только некоторые количественные изменения. Диаграммы КЭП для U и Е становятся почти

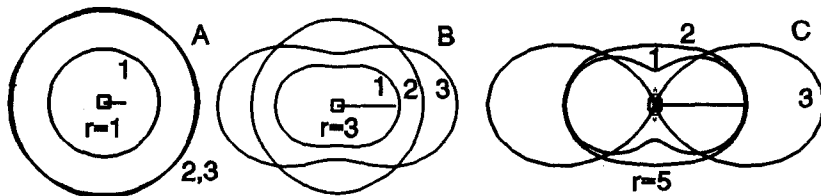


Рис.5.2.5. Диаграммы КЭП для модели А рис.5.2.2

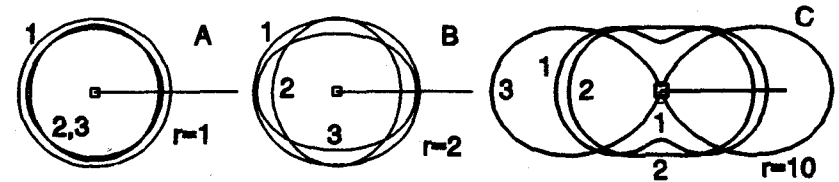


Рис.5.2.6. Диаграммы КЭП для модели С рис.5.2.2

идентичными, а диаграммы для D резко от них отличаются.

Пример. На рис.5.2.7 приведены результаты расчетов над моделью двух-слойной среды с анизотропным основанием, соответствующей условиям Крымской учебной практики. Смоделирован разрез плато Патиль. Нижняя часть разреза сложена породами таврической серии, залегающими

почти вертикально, с $\rho_m=45$ Ом.м, $\lambda=1.62$, а верхняя часть мощностью 10 м -

это известковистые песчаники резанской свиты с $\rho_1=450$ Ом.м. Расчеты показывают, что установка Шлюмберже (Е) в практическом интервале разносов дает очень слабые различия продольных и поперечных кривых ВЭЗ (А). Это объясняет неудачи предпринимавшихся время от времени попыток обнаружить анизотропию основания под слоем наносов с помощью установки Шлюмберже. Потенциал- установка АМ (U) может дать более заметный эффект анизотропии. Наилучший эффект можно получить при использовании установки ДЭП (D). Технологически наиболее удобно в одной точке выполнить зондирование с установкой Шлюмберже и круговые наблюдения с установкой ДЭП, что позволит охарактеризовать как слоистость, так и анизотропные свойства основания. На рис.5.2.7(В,С) приведены диаграммы КЭП для трех установок на разносах 30 (В) и 40 (С) м при мощности наносов 10 м. Начиная с $r/h=3-4$ установка ДЭП дает сильный эффект анизотропии.

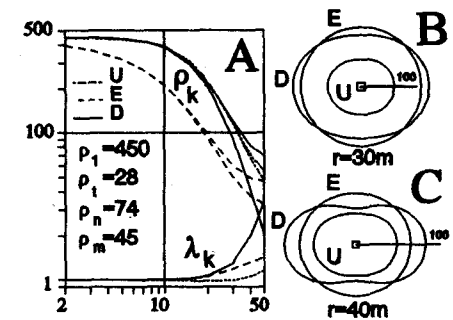


Рис.5.2.7. Расчеты ВЭЗ и КЭП для Ом.м, $\lambda=1.62$, а верхняя часть мощностью 10 м -

Выводы. Анализ результатов зондирования для потенциал (AM)-, градиент (AMN)-установок и ДЭЗ над двухслойной средой с анизотропным основанием показывает, что анизотропия и слоистость проявляются в широком интервале разносов совместно и их влиянием нельзя пренебречь. Эту задачу нельзя свести к более простой двухслойной модели с изотропными слоями или к модели анизотропного полупространства. Особенно противоречивый характер носят графики ρ_k ВЭЗ для градиент-установки (Е), где отмечается область исчезновения парадокса анизотропии. Поперечные восходящие кривые зондирования над двухслойным разрезом выглядят как трехслойные типа К. Это заставляет относиться к интерпретации данных над разрезами с анизотропным основанием с максимальной осторожностью и учитывать данные моделирования. Рекомендуется шире использовать установку ДЭЗ, обладающую максимально высокой чувствительностью к анизотропии.

5.3. Вертикальный контакт двух анизотропных сред

Рассмотрим решение задачи о поле точечного источника вблизи контакта двух анизотропных сред.

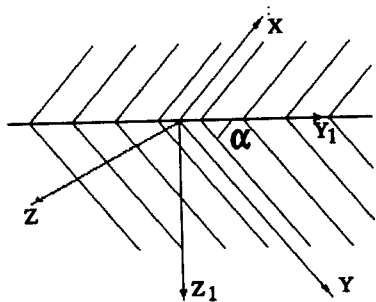


Рис.5.3.1. Первоначальная система координат, связанная со слоистостью

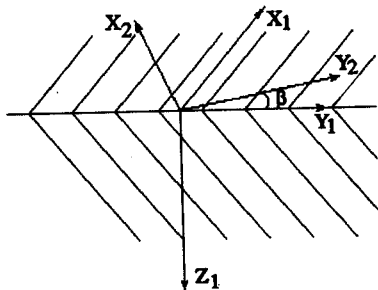


Рис.5.3.2. Переходная система координат. Ось X1 - вдоль слоистости

Определим систему координат, связанную со слоистостью анизотропной толщи (рис. 5.3.1). Пусть ось X направлена по простиранию слоистой толщи, ось Y - по ее падению (таким образом, оси X и Y лежат в плоскости падения анизотропной толщи), а ось Z - перпендикулярно плоскости падения анизо-

тропной толщи.

При переходе от вышеописанной системы координат (X, Y, Z) к системе координат (X1, Y1, Z1), в которой ось X1 направлена вдоль простирания анизотропной толщи, ось Z1 - вертикально вниз, а ось Y1 располагается перпендикулярно плоскости XOZ (см. рис.5.3.5). Вокруг оси X осуществляется поворот, причем матрица преобразования выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \quad (36)$$

где α - угол падения анизотропной толщи.

Теперь для описания наблюдений в любой точке на дневной поверхности необходимо перейти к произвольной системе координат, составляющей некоторый угол β с направлением слоистости.

Матрица перехода к описанной системе координат от первоначальной выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (37)$$

В результате получаем общую матрицу преобразования координат от исходной к произвольной:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta \cdot \cos\alpha & \cos\beta \cdot \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\beta \cdot \sin\alpha & -\cos\beta \cdot \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}. \quad (38)$$

Далее рассмотрим собственно решение поставленной задачи с помощью метода зеркальных отражений (рис.5.3.3).

Сначала проанализируем алгоритм решения для более простой ситуации - контакта двух изотропных сред.

Потенциал точечного источника в среде 1 равен:

$$U_1^{(1)} = \frac{I \rho_1}{2\pi r_1}.$$

Искажающее влияние среды 2 можно учесть, если в точку A' , которая является зеркальным отображением A относительно плоскости раздела, поместим фиктивный источник интенсивности I' (рис.5.3.3). Его потенциал равен:

$$U_1^{(2)} = \frac{I' \rho_1}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1'}.$$

Потенциал источника, находящегося в точке A , во второй среде равен:

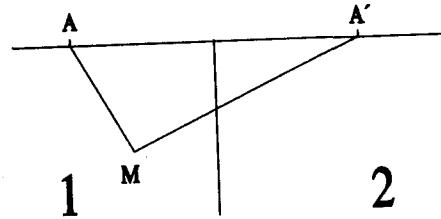


Рис.5.3.3. Мнимый источник тока A' в методе зеркальных отражений

$$U_2 = \frac{I'' \rho_2}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_2}.$$

Итак, потенциалы от точечного источника, помещенного в точку A , в первой и второй среде, соответственно, равны:

$$U_1 = U_1^{(1)} + U_1^{(2)} = \frac{I \rho_1}{2\pi r_1} + \frac{I' \rho_1}{2\pi r_1'};$$

$$U_2 = \frac{I'' \rho_2}{2\pi r_2}.$$

Здесь r_1, r_1' и r_2 - соответствующие расстояния от точек возбуждения до точек приема; I' имеет смысл интенсивности отраженного источника, а I'' - интенсивность реального источника во второй среде.

Таким образом, решение задачи в общем виде идет по следующей схеме. Сначала записываются выражения для потенциалов в первой и второй среде от точечного источника, находящегося в первой среде. Затем записываются граничные условия, из них выводятся выражения для I' и I'' . После того, как найдены интенсивности мнимых точечных источников, в требуемых точках определяются значения потенциала. Воспользуемся таким алгоритмом и все дальнейшие расчеты проведем аналогичным образом. Запишем выражения для потенциалов для данной ситуации.

Предположим, что имеется контакт двух анизотропных сред. В соответствии с общей теорией постоянного электрического поля в проводящих средах запишем физические условия задачи:

1. Потенциал в любой точке, кроме источников, удовлетворяет уравнению Лапласа: $\Delta U = 0$.

2. Вблизи источника потенциал удовлетворяет условию на из-

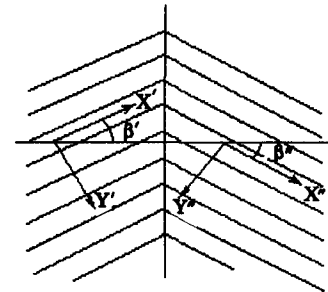


Рис.5.3.4. Системы координат в случае контакта двух анизотропных сред

точнике: при $R \rightarrow 0$, $U = (I \cdot \rho) / (2\pi R)$.

3. При $R \rightarrow \infty$, $U = 0$.

4. На дневной поверхности при $z = 0$, $J_z = 0$.

5. На контакте двух анизотропных сред должно соблюдаться равенство потенциалов и нормальных компонент плотности тока:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2; \\ J_n^{(1)} &= J_n^{(2)}. \end{aligned} \quad (39)$$

Для нашего случая $\vec{T}_n = \vec{T}_x$, следовательно $J_x^{(1)} = J_x^{(2)}$.

Принимая во внимание эти условия, приступим к решению задачи.

Выберем системы координат в этих средах следующим образом (рис.5.3.4): оси x' и x'' направлены вдоль простира-ния анизотропных толщ, а оси y' и y'' соответственно по падению; оси z' и z'' - перпендикулярно плоскости падения. В этих координатах формулы для потенциалов записываются следующим образом:

$$U_1^{(1)} = \frac{I \rho_1^{(1)} \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{2\pi \sqrt{\rho_1^{(1)}(x'^2 + y'^2) + \rho_n^{(1)} z'^2}}; \quad (40)$$

$$U_1^{(2)} = \frac{I' \rho_1^{(1)} \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{2\pi \sqrt{\rho_1^{(1)}(x'^2 + y'^2) + \rho_n^{(1)} z'^2}}; \quad (41)$$

$$U_2 = \frac{I'' \rho_1^{(2)} \sqrt{\rho_n^{(2)}}}{2\pi \sqrt{\rho_1^{(2)}(x''^2 + y''^2) + \rho_n^{(2)} z''^2}}. \quad (42)$$

Примем $I = 1$. Запишем граничные условия для потен-циала. Известно, что на границе $U_1 = U_2$, или, учитывая (40-42), запишем коэффициенты при I' , используя (39):

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_1^{(1)} \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{2\pi \sqrt{\rho_1^{(1)}(x'^2 + y'^2) + \rho_n^{(1)} z'^2}} = \\ & = \frac{\rho_1^{(1)} \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{2\pi r \sqrt{\rho_1^{(1)}(\cos^2 \beta'_1 + \cos^2 \alpha'_1 \cdot \sin^2 \beta'_1) + \rho_n^{(1)} \cdot \sin^2 \alpha'_1 \cdot \sin^2 \beta'_1}}, \end{aligned} \quad (43)$$

где

$$\begin{aligned} \cos \beta'_m &= \cos \varphi \cdot \cos \beta_m + \sin \varphi \cdot \sin \beta_m; \\ \sin \beta'_m &= \sin \varphi \cdot \cos \beta_m - \cos \varphi \cdot \sin \beta_m; \end{aligned} \quad m = 1, 2,$$

где φ - азимут разности относительно профиля. Коэффициент при I'' :

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_1^{(2)} \sqrt{\rho_n^{(2)}}}{2\pi r \sqrt{\rho_1^{(2)}(\cos^2 \beta'_2 + \cos^2 \alpha'_2 \cdot \sin^2 \beta'_2) + \rho_n^{(2)} \cdot \sin^2 \alpha'_2 \cdot \sin^2 \beta'_2}} \\ & \quad (44) \end{aligned}$$

Рассмотрим второе граничное условие - равенство x -компоненты плотности тока. В итоговой системе координат

$$J = \begin{bmatrix} J_{x'} \\ J_{y'} \\ J_{z'} \end{bmatrix} \cdot A,$$

где A - матрица преобразования координат (3).

Нас интересует только J_x :

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x'} \\ J_{y'} \\ J_{z'} \end{bmatrix} \cdot A_1,$$

где A_1 - верхняя строка матрицы A .

Преимущество предлагаемого решения заключается в том что данный путь позволяет рассматривать отдельно правую

левую части граничных уравнений каждую в своей системе координат, формально приравнявая (с некоторыми коэффициентами) плотности тока по обе стороны равенства.

Запишем выражение для J_x :

$$J_x = J_{x'} \cdot \cos \beta - J_{y'} \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta + J_{z'} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta. \quad (45)$$

Здесь

$$J_{x'} = \sigma_{x'x'} \cdot E_{x'}, \quad J_{y'} = \sigma_{y'y'} \cdot E_{y'}, \quad J_{z'} = \sigma_{z'z'} \cdot E_{z'},$$

$$\sigma_{x'x'} = \frac{1}{\rho_l}, \quad \sigma_{y'y'} = \frac{1}{\rho_l}, \quad \sigma_{z'z'} = \frac{1}{\rho_n},$$

в свою очередь

$$E_{x'} = \frac{\partial U}{\partial x'}, \quad E_{y'} = \frac{\partial U}{\partial y'}, \quad E_{z'} = \frac{\partial U}{\partial z'}.$$

Тогда, находя соответствующие производные и делая простейшие преобразования, получим:

$$J_x^{(1)} = 2k_1' (1+l') [x' \cdot \cos \beta_1 - y' \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 + z' \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1];$$

$$J_x^{(2)} = 2k_2' l'' [x'' \cdot \cos \beta_2 - y'' \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 + z'' \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \beta_2],$$

$$\text{где } k_1' = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\rho_l^{(1)} \cdot \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{(\rho_l^{(1)} (x'^2 + y'^2) + \rho_n^{(1)} z'^2)^{\frac{3}{2}}};$$

$$k_2' = -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\rho_l^{(2)} \cdot \sqrt{\rho_n^{(2)}}}{(\rho_l^{(2)} (x''^2 + y''^2) + \rho_n^{(2)} z''^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Воспользовавшись приведенными ранее преобразованиями системы координат, получим для первой среды:
Аналогично для второй среды:

$$x' = x \cdot \cos \alpha_1 + y \cdot \sin \beta_1;$$

$$y' = -x \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 + y \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 + z \cdot \sin \alpha_1;$$

$$z' = x \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 - y \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 + z \cdot \cos \alpha_1.$$

$$x'' = x \cdot \cos \alpha_2 + y \cdot \sin \beta_2;$$

$$y'' = -x \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 + y \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos \beta_2 + z \cdot \sin \alpha_2;$$

$$z'' = x \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 - y \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \beta_2 + z \cdot \cos \alpha_2.$$

Переходя к произвольной системе координат и легко вычисляя теперь все коэффициенты при l' и l'' , получаем достаточно простую систему уравнений вида:

$$a_1 \cdot l' + b_1 \cdot l'' = c_1;$$

$$a_2 \cdot l' + b_2 \cdot l'' = c_2,$$

где a_1 , b_1 и c_1 - коэффициенты из граничных условий для потенциала, а a_2 , b_2 и c_2 - из граничных условий для нормальной компоненты плотности тока.

Все описанные выше выкладки проведены для случая, когда источник тока располагается в первой среде. В случае, когда источник тока располагается во второй среде, выкладки полностью аналогичны.

С использованием приведенных здесь формул написана программа ASA (Anisotropic Sounding Analysis), с помощью которой можно рассчитать потенциал точечного источника, расположенного на поверхности земли, в любой точке земной поверхности вблизи контакта двух анизотропных сред. Программа была протестирована программами В.А.Шевнина NIZ_CON и ANIZ_UZ, предназначенными для расчетов потенциалов и кажущихся сопротивлений вблизи контакта двух анизотропных толщ (ANIZ_CON) и в однородной анизотропной среде (ANIZ_UZ).

Кроме того, были проверены граничные условия и условия на источнике; а также "зеркальность" эллипсов для случая симметричной среды.

Необходимо отметить, что в алгоритме программы ASA профиль, по которому проводятся измерения, перпендикулярен контакту двух анизотропных сред. В этом случае контакт направлен вдоль оси Y , профиль - вдоль оси X , а началом координат является точка пересечения разлома (контакта) и профиля. В программе предусмотрено использование следующих установок. Их поворот ведут против часовой стрелки.

1. Симметричная четырехэлектродная установка. Начальное положение (0-й азимут) - все электроды стоят на линии профиля. Вращение установки вокруг центра mn .
2. Трехэлектродная установка Amn , B - в бесконечности. Начальное положение - электроды A, m, n стоят на линии профиля. Вращение - вокруг центра mn .
3. Потенциал - установка Am , электроды n и B в бесконечности. Начальное положение: электроды A и m стоят на линии профиля, поворот питающего электрода A происходит вокруг приемного электрода m .
4. Дипольная осевая установка $mnAB$. Нулевой азимут: все электроды стоят на линии профиля. Поворот - вокруг центра mn .
5. Дипольная экваториальная установка $mnAB$. Начальное положение: центры диполей стоят на линии профиля. Поворот - вокруг центра mn .

В результате моделирования по программе ASA был получен ряд интересных результатов (рис.5.3.5) и исследованы новые подходы к анализу полевых данных, полученных в результате круговых наблюдений. На основании результатов данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Создан аппарат математического моделирования электрического поля вблизи контакта двух анизотропных сред для круговых установок, что является очередным шагом вперед по сравнению с ранее решенными задачами.

2. Вблизи контакта двух анизотропных сред на-

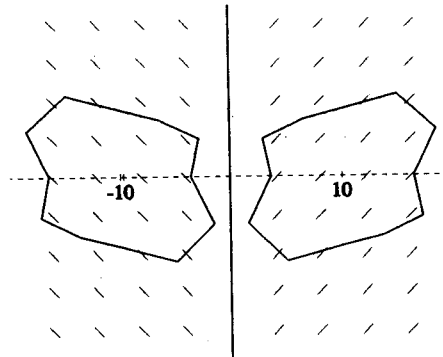


Рис.5.3.5. Пример кругового профилирования вблизи контакта

блюдается искажение круговых диаграмм кажущегося сопротивления, которое выражается в появлении дополнительных максимумов, соответствующих простиранию пород в соседней анизотропной толще (рис.5.3.5).

5.4. Интерпретация данных кругового ЭП над анизотропным полупространством

Круговое ЭП (КЭП) применяется для решения многих задач: выявления анизотропии массива горных пород, оценки коэффициента анизотропии и направления простирания анизотропной толщи, картирования областей распространения анизотропных пород, исследования структурных особенностей территории, оценки напряженного состояния массива горных пород, элементов залегания угольных пластов и зон трещиноватости, водообильности толщ и др.

Несмотря на такое разнообразие задач, решаемых круговым ЭП, обработка данных этого метода заключается в большинстве случаев в графическом изображении круговых диаграмм и качественной или полуколичественной интерпретации. Количественная оценка геоэлектрических параметров анизотропной среды выполняется редко, так как является рудоемкой и во многих случаях практически неосуществима без использования компьютера.

Большие объемы КЭП (до 100 точек кругового ЭП по одному профилю или участку), получаемые на кафедре геофизики МГУ при полевых работах в районах с ярко проявляющейся анизотропией горных пород (Чукотка, Донбасс, Крым) возросший интерес к параметрам анизотропных сред стимулировали разработку алгоритма и программы для интерпретации данных круговых наблюдений.

АЛГОРИТМ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КЭП

Для решения обратной задачи КЭП используется алгоритм итерации. На каждой итерации решается прямая задача для однородного анизотропного полупространства, сравниваются теоретические и экспериментальные данные для оценки их различий и внесения поправок в параметры модели среды с целью минимизации этих различий. Решение прямой задачи производится по аналитическим формулам, в основе которых лежит определение значения потенциала в точке M точечного источника, расположенного в точке A на поверхности одно-

родного анизотропного полупространства:

$$U_{AM} = \frac{I \rho_T \sqrt{\rho_N}}{2\pi r_{AM} \sqrt{\rho_T \cdot (\cos^2 \beta + \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \beta) + \rho_N \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \beta}}$$

где: I - ток, стекающий с точечного электрода расположенного в точке А; r_{AM} - расстояние между точками А и М; β - угол между прямой соединяющей точки А и М и направлением простирания пород анизотропной толщи, ρ_N - сопротивление однородного анизотропного полупространства вкrest слоистости, ρ_T - сопротивление однородного анизотропного полупространства вдоль слоистости. Угол падения пластов (α) предполагается известным из априорных данных. Кажущееся сопротивление рассчитывается через потенциалы, создаваемые в точках М и N питающими электродами А и В

$$\rho_K = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$\Delta U_{MN} = U_{AM} - U_{AN} - U_{BM} + U_{BN}$$

Вычисления производятся для всех заданных азимутов установки.

Точность подбора или невязка между теоретической кривой ρ_K^T и экспериментальной $\rho_K^Э$ вычисляется по формуле:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{K_i}^Э - \rho_{K_i}^T}{\rho_{K_i}^Э} \right)^2} \cdot 100 \%$$

где n - количество направлений, по которым производились полевые измерения в точке кругового ЭП; i - номер направления.

Для построения алгоритма обратной задачи КЭП был исследован характер частных производных функции кажущегося сопротивления по параметрам ρ_n , ρ_t , β . Их графики приведены на рисунке 5.4.1. Расчеты показали, что частная производная по параметру β имеет достаточно малые значения (приведенные на графике значения увеличены в 10 раз), а частные производные по параметрам ρ_n и ρ_t сильно коррелируют и гораздо больше по величине. Эти особенности поведения частных производных были учтены при построении алгоритма.

Алгоритм нахождения вектора параметров ρ_n , ρ_t , β состоит из трех основных этапов. На первом этапе производится грубая оценка продольного - ρ_t и поперечного ρ_n сопротивлений среды, на втором этапе - подбор угла простирания пород - β , а на третьем этапе - уточнение сопротивлений ρ_n и ρ_t .

За исходное направление простирания пород выбирается такое направление, на котором зафиксировано максимальное значение ρ_K . Кроме того, мы располагаем некоторым сектором S , ограниченным двумя направлениями с наибольшими значениями ρ_K , и можем сделать вывод, что направление простирания пород находится в этом секторе. Возможно нахождение этого направления с помощью одномерной минимизации функции цели.

Когда оптимальное направление простирания пород найдено, можно перейти к третьему этапу алгоритма - одновременной оценке ρ_n и ρ_t . По окончании процесса минимизации мы получаем вектор параметров ρ_n^* , ρ_t^* , β^* , являющийся решением обратной задачи, и соответствующую ему невязку между теоретической и экспериментальной кривыми.

ПРОГРАММА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Программа "CRM" ("Circular Resistivity Measurement") для интерпретации данных кругового электропрофилирования использует описанный выше алгоритм. В программе предусмотрена интерпретация данных, полученных при круговых электрометрических наблюдениях с наиболее часто используемыми установками (Шлюмберже, трехэлектродной, дипольной осевой, дипольной экваториальной и потенциал-установкой), располагающимися на поверхности анизотропного полупространства.

В программе реализована визуализация результатов на экране дисплея в виде круговых диаграмм и выдача графической информации на принтер. Обработка и интерпретация

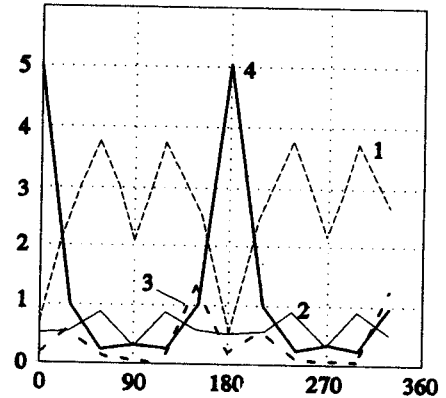


Рис.5.4.1 Частные производные ρ_K по ρ_n (1), по ρ_t (2), по β (3) и ρ_K КЭП(4)

серии данных КЭП по профилю осуществляются поочередно в режиме диалога.

На рис. 5.4.2 изображена схема программы CRM, на которой показан обобщенный вид программы и номера блоков соответствуют рекомендуемой последовательности прохождения шагов программы при интерпретации.

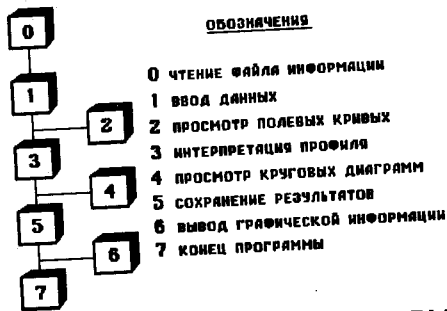


Рис.5.4.2 Схема программы CRM

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММЫ

Программа CRM тестировалась с помощью серии теоретических кривых ρ_k для углов поворота симметричной и дипольной экваториальной установок в 30 градусов. Первое направление для каждой модели выбиралось так, чтобы угол между осью установки и направлением простирания пород анизотропной толщи оказывался разным. Таким образом моделировалась реальная ситуация: азимут простирания пород - неизвестен. Проведены четыре цикла испытаний - для данных без погрешностей и данных со случайными погрешностями в 5, 10 и 20%.

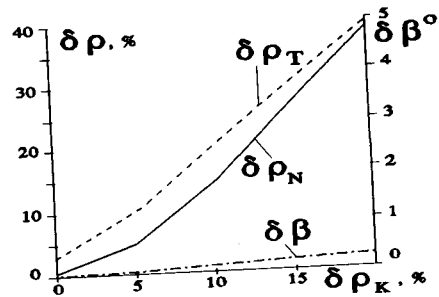


Рис.5.4.3. Зависимость ошибок в оценках параметров от ошибок в ρ_k

Результаты решения обратных задач для двух установок и четырех циклов испытаний показали следующее. Невязки при интерпретации данных ДЭП как правило больше, чем для СЭП, однако ошибки в оценке параметров больше для СЭП, что подтверждает предположение о более высокой чувствительности установки ДЭП к анизотропии. С ростом погрешностей в данных от 0 до 20% пропорционально растут и ошибки в оценке параметров. Для СЭП (Рис. 5.4.3) они достигают 40% для ρ (для ДЭП - 8%), и не превышают 1° для угла β . Программа CRM использовалась для интерпретации разнообразных практических материалов КЭП.

ПРИМЕНЕНИЕ КРУГОВОГО ЭП НА УЧЕБНОЙ ПРАКТИКЕ В КРЫМУ

В ходе практики по электроразведке в Крыму студенты изучают анизотропию пород таврической серии с помощью круговых ЭП на плато Патиль. Данная порода представляет собой мощную толщу переслаивания тонких (от 2 до 40 см) прослоев песчаников, аргиллитов и алевролитов как правило с крутыми углами падения и заметной электрической анизотропией.

На рисунках 5.4.4 и 5.4.5 приведены результаты кругового СЭП по профилю длиной 200 м через контакт пород таврической серии.

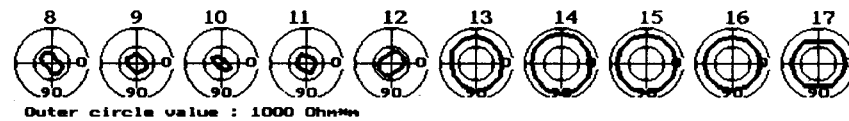


Рис.5.4.4. Круговые ЭП по профилю на плато Патиль

кой серии (ρ пород около 50 Ом.м) и перекрывающих их горизонтально залегающих известковых песчаников резанской свиты ($\rho > 400$ Ом.м).

На рис.5.4.4 приведены круговые диаграммы для части профиля вблизи контакта, а на рисунках 5.4.5, А-С графики параметров анизотропии, определенных по программе CRM.

По круговым диаграммам с 13-го пикета начинается резкая смена значений ρ , т.к. на анизотропном полупространстве появился горизонтально-

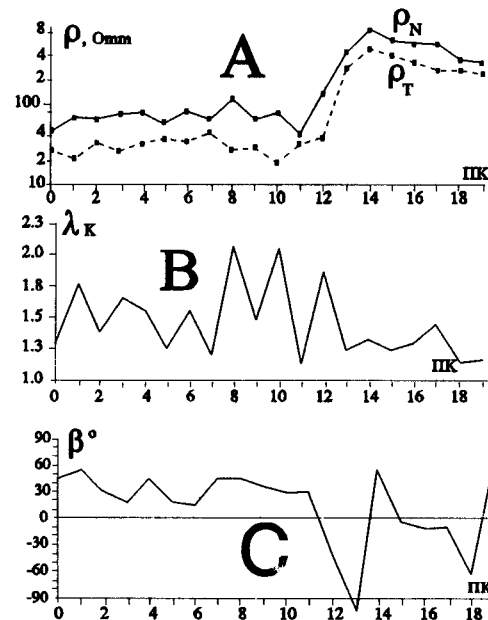
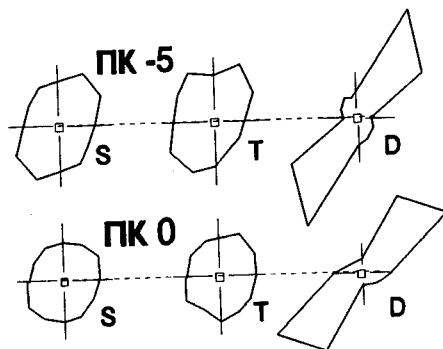


Рис.5.4.5. Результаты КЭП в Крыму (А,Б)

залегающий слой со значительно более высоким ρ . Этот слой является как бы фильтром, уменьшающим влияние анизотропного основания. Фактически, модель анизотропного полупространства более не правомочна и результаты интерпретации по программе CRM можно рассматривать лишь как некие формальные параметры. Тем не менее, представление КЭП лишь в виде круговых диаграмм недостаточно наглядно и поэтому оно дополнено графиками параметров по результатам интерпретации (рис.5.4.5). Графики ρ_N и ρ_T (рис.5.4.5,А) очень выразительно отражают пологий контакт двух контрастных по сопротивлению толщ, но его скорее можно найти на 12, а не на 13 пикете. Рис. 5.4.5,С показывает устойчивое простирание КЭП вплоть до ПК 11, а затем оценки простирания становятся неустойчивыми. График коэффициента анизотропии (Рис.5.4.5,В) до ПК7 находится на уровне 1.4-1.5, возрастает до 2 на ПК8-12 (при этом растет и дисперсия), а с 13 ПК заметно уменьшается до 1.2-1.3 и ведет себя более спокойно. По визуальным геологическим наблюдениям на поверхности контакт пород можно обнаружить между 9 и 10 ПК, но сразу за контактом слой песчаников еще очень тонок, разбит многочисленными трещинами и в результате кроме анизотропии здесь заметно влияют горизонтальные неоднородности разреза.



На рис.5.4.6 показаны результаты наблюдений на 5 и 0 двух пикетах в пределах таврической серии (-5 и 0), выполненных тремя установками: симметричной, трехэлектродной AMN и дипольной экваториальной.

Результаты интерпретации для СЭП и ДЭП представлены в таблице 5.4.1. Интересно отметить следующие особенности этих данных. Средние невязки по результатам интерпретации КЭП составляют для симметричной установки - 4, для AMN - 10, и для ДЭП - 20%. Эти цифры можно рассматривать как косвенную суммарную оценку влияния геологических помех и

ошибок наблюдений на различные типы установок.

Табл.5.4.1.

Результаты интерпретации КЭП на ПК -5 и 0

Пк	Уст	ρ_N	ρ_T	β	λ
-5	СЭП	74.7	28.9	7.5	1.61
-5	ДЭП	72.9	27.8	7.5	1.62
0	ДЭП	52.6	22.3	22.5	1.54
0	ДЭП	65.6	28.7	25.0	1.51
0	СЭП	45.0	32.8	27.1	1.17
0	СЭП	58.9	31.5	22.5	1.37

Результаты интерпретации СЭП и ДЭП для ПК-5 очень близки, а для ПК 0 заметно отличаются (особенно по λ). На наш взгляд это можно объяснить тем, что на ПК-5 фиксируется лишь влияние анизотропии, а на ПК0 заметный вклад вносят неоднородности разреза.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ НА УЧАСТКЕ КРАСНООКТЯБРЬСКИЙ В ДОНЕЦКЕ

Круговое ЭП на этом участке было поставлено с целью выявления малоамплитудной и слабопроявленной тектонической зоны, наличие которой предполагалось по геологическим данным, но ее точное местоположение не было известно.

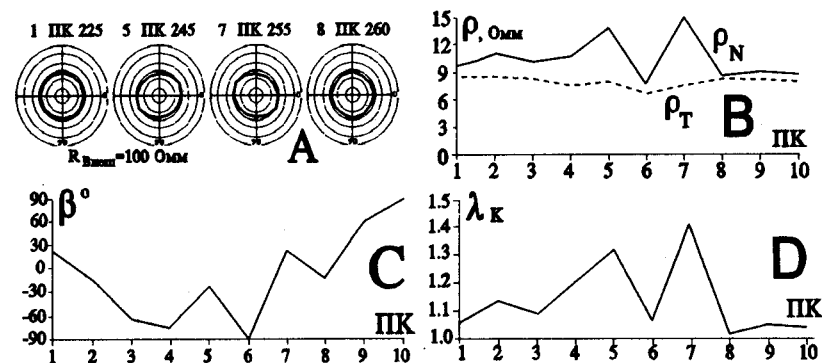


Рис.5.4.7. Результаты КЭП в г.Донецке

Выявление малоамплитудных тектонических зон является в данном районе очень важной задачей как в связи с разработкой угольных пластов, так и при проектировании строительства на подрабатываемых территориях. Обычное электропрофилирование, проведенное на площади данного участка, не позволило обнаружить тектоническую зону и поэтому пришлось выполнять круговые ЭП.

На рис.5.4.7, В-D показаны результаты КЭП по фрагменту (10 точек с шагом 5 м) одного профиля. Круговые диаграммы для 4 пикетов КЭП (N 1,5,7,8), где различия их формы наиболее заметны показаны на рис.5.4.7, А. На рис.5.4.7, В график ρ_T невыразителен, а ρ_n имеет 2 максимума в точках 5 и 7. График азимутов простирания КЭП (Рис.5.4.7, С) представляет собой пологий минимум с заметными нарушениями плавного хода кривой на участке 4-8 ПК. Судя по графику λ (рис. 5.4.7, D) максимальная вытянутость диаграмм отмечается в точках 5 и 7. При уровне фона λ 1.05-1.1 в аномальных точках λ достигает 1.3-1.4. Таким образом, границы тектонической зоны установлены в точках 5 и 7. В данном случае круговое ЭП позволило выявить тонкие детали геологического строения территории, которые не удалось обнаружить обычным ЭП.

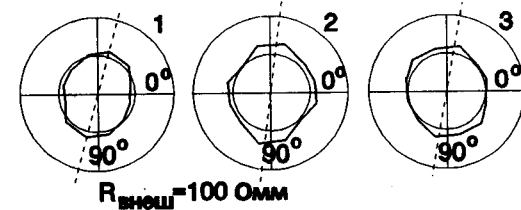
ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ В РАЙОНЕ РЕКИ САН-ХУАН (МЕКСИКА)

В августе 1992 года геолого-геофизическим отрядом геологического факультета МГУ проводились полевые работы в Мексике в провинции Нуэво-Леон, район города Чина.

Целью геологических и геофизических исследований являлось изучение территории, проектируемого водохранилища на реке Сан-Хуан и прогноз развития инженерно-геологических процессов при эксплуатации водохранилища. В комплексе геофизических методов, применяемых для решения поставленной задачи, входили электрометрические наблюдения, в том числе и круговые измерения.

Геологический разрез на этом участке представлен переслаиванием рыхлых алевролитов и плотных песчаников мелового возраста. Мощность прослоев 1-10 м. Пласты падают на восток под углом 5-10°. Плотные песчаники обладают трещиноватостью, угол падения которой около 90°, а основное направление простирания трещин следовало уточнить. Круговые наблюдения проводились с шагом по азимутам в 30°, с экваториальной установкой (AB=MN=5 м, OO'=40 м) на трех пикетах,

удаленных друг от друга на расстояние 100 и 400 м, вдоль дамбы, внутри контура будущего водохранилища.



Круговые диаграммы ρ_k приведены на рисунке 5.4.8. При интерпретации выделено преобладающее направление трещиноватости перпендикулярное простиранию дамбы.

Результаты интерпретации позволяют сделать вывод, что при эксплуатации водохранилища возможно сильное проявление фильтрационных процессов. Особенно интенсивная фильтрация ожидается в направлении преобладания трещиноватости. Была сделана попытка подсчета возможных потерь воды за счет фильтрации по этому направлению под дамбой. Для этого проведена серия связанных друг с другом расчетов.

1. По круговым ЭП оценены $\rho_n = 19$, $\rho_f = 13$, $\lambda = 1.2$.
2. Построена модель трещиноватой водонасыщенной горной породы состоящей из прослоев породы и воды с коэффициентом анизотропии, равным установленному и с такими отношениями сопротивлений и мощностей, чтобы значение коэффициента анизотропии было равно 1.2 и значения продольного и поперечного сопротивлений совпадали с найденными.
3. Для этой модели оценено значение коэффициента трещиноватости, равное 2-3 (%) и 4. коэффициент фильтрации 4-6 (м/сутки).
5. По закону Дарси при значении гидродинамического градиента 0.2 (10м/50м), был рассчитан возможный расход воды через площадку 100 м²: 100 м³/сутки.
6. Используя оценку расхода для площадки, было рассчитано, что будущее водохранилище может в сутки терять 10000 тонн воды из-за фильтрации через сеть трещин в зоне длиной около 1 км. Чтобы избежать подобных потерь воды строителям следует обратить внимание на качество противофильтрационных мероприятий (завесы) под дамбой и вести мониторинг за фильтрацией воды в процессе заполнения водохранилища.

ЛИТЕРАТУРА

1. АБРАМОВА Е.Ш. Способ оперативного и точного вычисления интегралов, применимый к расчету ряда геофизических кривых. ВСЕГИНГЕО, препринт, 1985. 12 с.
2. БЕРДИЧЕВСКИЙ М.Н., ЯКОВЛЕВ А.Г. Аналитическая модель МТЗ, искаженного эффектом S // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. N 9. С. 82-88.
3. БЕРДИЧЕВСКИЙ М.Н., ЯКОВЛЕВ А.Г., МОДИН И.Н. Искажения кривых ВЭЗ в горизонтально-неоднородных средах // Использование новых геофизических методов для решения инж.-геол. и гидрогеол. задач / Тез.докл. 10 Всесоюзн.науч.-техн.семинара. М., 4-6 июня 1989. С. 14-16.
4. БЕРЕЗИНА С.А., БОБАЧЕВ А.А., МОДИН И.Н., ХМЕЛЕВСКОЙ В.К., ШЕВНИН В.А., ЯКОВЛЕВ А.Г. Интерпретация электрических зондирований в неоднородных средах / Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология. 1994. N 2. 12 с.
5. БЛОХ И.М. Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Недра, 1971. 216 с.
6. БОБРОВНИКОВ Л.З., КАДЫРОВ И.Н., ПОПОВ В.А. Электроразведочная аппаратура и оборудование. М., Недра, 1985. 336 с.
7. БОГОЛЮБОВ А.Н., БОГОЛЮБОВ Н.П., МОЗГАНОВА Е.А. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. М., Стройиздат. 1984. 200 с.
8. Д.К.БОЛЬШАКОВ, И.Н.МОДИН, ШЕВНИН В.А. Программа для интерпретации данных кругового ЭП над анизотропным полупространством. // 'Геофизик', 1994. N 4. 10 с. (в печати).
9. БРЕДНЕВ И.И., СЫСКОВ С.С. Поле точечного источника тока в присутствии анизотропной вертикально-слоистой среды, перекрытой слоем изотропных образований. // Геофизические методы поисков и разведки. 1976. Вып.3. С.26-34.
10. БУРСИАН В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л., Недра. 368 с.
11. ВЕНЦАЛЕК Р. Автоматизация интерпретации профильных ВЭЗ. Автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М., МГРИ, 1991. 27 с.
12. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ТЕХНИКА В РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ. Справочник геофизика / Под ред. В.И.Дмитриева. М., Недра. 1982. 1990. 222 с.
13. ГАЛИН Д.Л. Интерпретация данных инженерной

- геофизики. М., Недра. 1989. 124 с.
14. ГУРЕВИЧ Ю.М. К теории вертикальных электрических зондирований анизотропных сред // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли, 1975. N7. С.102-105.
15. ГУРЕВИЧ Ю.М., САЖИНА О.В. Электрическое поле точечного источника тока, погруженного в двухслойное анизотропное полупространство // Разведочная геофизика. 1977. Вып. 74. С.37-45.
16. ДАХНОВ В.Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Недра. 1982. 340 с.
17. ДАШЕВСКИЙ Ю.А. Применение преобразования Эйлера для расчета стационарных и гармонических электромагнитных полей в горизонтально-слоистых средах // Сборник научных трудов СОАН, под ред. Ю.Н.Антонова. Новосибирск, 1982. С. 78-88.
18. ДМИТРИЕВ В.И. Методы решения обратных задач разведочной геофизики // Вестн. Моск.ун-та, сер. Вычисл. мат. и кибернет. 1986. N3. С.42-51.
19. ЖДАНОВ М.С. Электроразведка. М., Недра. 1986. 316 с.
20. ЗАБОРОВСКИЙ А.И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат. 1963. 424 с.
21. ЗЕМЦОВ В.Н., ШАК В.Г. Электрические зондирования на постоянном токе в рудных районах. М., Недра. 1990. 108 с.
22. ИЗОТОВА Е.Б., ЕРМОХИН К.М., ПЕТРОВ А.А., ФЕДОРОВ А.Н. Интерпретация зондирований в неоднородных средах // Зап. ЛГИ, 1987. Т. 113. С. 73-79.
23. ИЗОТОВА Е.Б., НИКИТИНА Л.А., ЕРМОХИН К.М. Способ интерпретации площадных съемок стационарных электрических полей // Методы развед. геофиз. Теория и практика интерпретации в рудной геофизике. Л., 1981. С. 9-18.
24. ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ. Л., Недра. 1984. 352 с.
25. КОЗАК С.З. Поле точечного источника тока в горизонтально-слоистой анизотропной среде // Геология и геофизика. 1984. N 9. С.134-138.
26. КОЛЕСНИКОВ В.П. Обработка и интерпретация результатов вертикального электрического зондирования с помощью ЭВМ. М., Недра. 1981. 141 с.

27. КРАЕВ А.П. Основы геоэлектрики, часть 1. М.-Л. 1951.
28. КУСКОВ В.В. К вопросу об искажениях кривых ВЭЗ в условиях негоризонтальных границ раздела // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геол. 1979. N5. С. 68-72.
29. КУСКОВ В.В. Численное моделирование вертикальных электрических зондирований в двумерно-неоднородных средах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геол. 1985. С. 51-55.
30. КУСКОВ В.В., ЯКОВЛЕВ А.Г. Электрическое поле в неоднородной среде // Электроразведка, справочник геофизика. М., Недра. 1989. С. 59-75.
31. КУФУД О. Зондирование методом сопротивлений. М., Недра. 1984. 270 с.
32. ЛОБАНОВ Е.М., ВАРЛАМОВ Н.М. Способ измерения анизотропии электрического сопротивления и его практическое применение // Разведочная геофизика, вып. 63. М., Недра, 1974, с.76-82.
33. ЛЯХОВИЦКИЙ Ф.М., ХМЕЛЕВСКОЙ В.К., ЯЩЕНКО З.Г. Инженерная геофизика. М., Недра. 1989. 252 с.
34. МАТВЕЕВ Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М., Недра. 1974. 232 с.
35. МАТВЕЕВ Б.К. Электроразведка при поисках месторождений полезных ископаемых. М., Недра. 1982. 376 с.
36. МАТВЕЕВ Б.К. Электроразведка. М. Недра. 1990. 368 с.
37. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ по применению точечных зондирований для построения геоэлектрического разреза. Л., 1989. 62 с.
38. МЕТОДЫ ГЕОФИЗИКИ в гидрогеологии и инженерной геологии. М., Недра. 1985. 184 с.
39. МОДИН И.Н., АКУЛЕНКО С.А., ШЕВНИН В.А. Изучение анизотропии электроразведкой на постоянном токе при решении геологических задач // Тезисы докл. междунар. научн. конф. "Геофизика и современный мир", 9-13 авг. 1993. М. С. 339.
40. МОДИН И.Н., БЕРЕЗИНА С.А., ШЕВНИН В.А., ЯКОВЛЕВ А.Г. Современные подходы к интерпретации данных метода сопротивлений // Тезисы докл. междунар. научн. конф. "Геофизика и современный мир", 9-13 авг. 1993. М. С. 227-228.
41. МОДИН И.Н., БОБАЧЕВ А.А., ЛЮБЧИКОВА А.В., МАРЧЕНКО М.Н. Двумерные трансформации разрезов кажущегося сопротивления // Тезисы докл. междунар. научн. конф.

- "Геофизика и современный мир", 9-13 авг. 1993. М. С.338-339.
42. МОДИН И.Н., ПЕРВАГО Е.В., СМИРНОВА Т.Ю., ЯКОВЛЕВ А.Г. Расчет кажущегося сопротивления над сложными геоэлектрическими разрезами методом интегральных уравнений / Вестник Моск. ун-та. Серия Геология, 1992. N 3. С.91-95.
43. МОДИН И.Н., ШЕВНИН В.А., ДРОЗДОВА О.Л. Анализ геологических возможностей ВЭЗ с использованием кривых Дар-Заррук // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геол. N3. 1986. С. 88-95.
44. МОДИН И.Н., ШЕВНИН В.А. Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения // Прикладная геофизика. 1984. Вып.109. С. 75-82.
45. МОДИН И.Н., ШЕВНИН В.А. и др. Искажения кривых электрических зондирований приповерхностными неоднородностями и способы их учета // Геофизические исследования в гидрогеологии и инженерной геологии. Расширенные тезисы докладов всесоюзного семинара по применению геофизических методов в гидрогеологии и инженерной геологии, ч.II / Тр. Гидроингео, Ташкент, 1991. С.66-72.
46. МОДИН И.Н., ЯКОВЛЕВ А.Г. Алгоритм и некоторые результаты численного моделирования поля постоянного тока в трехмерно-неоднородных средах методом интегральных уравнений // Мат-лы 13-ой научн. конф. молодых ученых и асп. геол.ф-та МГУ. Секция геофиз. М., 1987. Деп.в ВИНТИ, N 6660-В87. 10 с.
47. МЫЦИК Н.В. Алгоритм интерпретации кривых вертикальных электрических зондирований // Геол.и геогр. Минск, 1984. N6. С. 30-39.
48. МЫЦИК Н.В. Программа для машинной интерпретации ВЭЗ и опыт ее применения в Белоруссии // Геол., гидрогеол., полезн. ископ. Белоруссии, методы их исследования. Минск, 1982. 137 с.
49. НИКИТИН А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М., Недра. 1979. 280 с.
50. ОГИЛЬВИ А.А. Геоэлектрические методы изучения карста. М. 1957. 161 с.
51. ОГИЛЬВИ А.А. Основы инженерной геофизики. М., Недра, 1990. 501 с.
52. ОДИНЦОВ К.Л., МОДИН И.Н. Пешеходная русловая электроразведка методом сопротивлений для изучения таликов

// Мат-лы ХУ-ой науч. конф. молодых ученых и асп. МГУ. Сер. геофизика, М., 1988. Деп. в ВИНТИ N6253-B88. 8 с.

53. ПЕТРОВ А.А., ФЕДОРОВ А.Н. Решение обратной задачи электроразведки методами постоянного тока и вызванной поляризации // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. N 11. С. 60-65.

54. ПЕТРОВ А.А., ФЕДОРОВ А.Н. Интерпретация данных электроразведки постоянным током в условиях неровного рельефа // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. N 12. С. 84-88.

55. ПОРОХОВА Л.Н., ШЕВНИН В.А., БАХИРОВ А.Г. Интерпретация кривых ВЭЗ на ЭВМ с оценкой эффективности решения // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 1987. N8. С. 74-80.

56. ПЫЛАЕВ А.М. Руководство по интерпретации ВЭЗ. М., Недра. 1968. 148 с.

57. РАБИНОВИЧ Б.И., КЕЖУТИН П.Г. Электрические зондирования методом вычитания полей // Геология и геофиз. N5. 1962. С. 107-119.

58. РОГОВА С.А., ЯКОВЛЕВ А.Г. Прямая задача электрического зондирования горизонтально-слоистого разреза для произвольной установки / Вестник Моск. ун-та, сер. Геология. 1992, N6. С.92-95.

59. РЫЖОВ А.А. Основные закономерности вызванной поляризации горных пород // Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых. М., изд. МГРИ, 1987. С. 5-23.

60. РЫЖОВ А.А., СУДОПЛАТОВ А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-техн. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., 1990. С. 27-41.

61. РЫЖОВ А.А., КАРИНСКАЯ И.Д. Программы решения прямой и обратной задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для ЭВМ серии ЕС. М., 1981. 134 с.

62. СЕМЕНОВ А.С. Анизотропия горных пород и особенности электрических полей в анизотропных средах // Вестн. ЛГУ. 1975. N 24. С.40-47

63. СЕМЕНОВ А.С. Изучение анизотропии пород по измерениям поля точечного источника тока // Уч. зап. ЛГУ. 1973. N 372 (Вопросы геофизики, вып. 23). С.153-168.

64. СЕМЕНОВ А.С., НОВОЖИЛОВА М.Е. Измерение анизотропии удельного электрического сопротивления горных пород // Вестн. ЛГУ. 1982. N6. С.5-13.

65. СЕМЕНОВ А.С., ФОКИН А.Ф., ВЕШЕВ А.В., НОВОЖИЛОВА М.Е. Поле точечного источника тока на плоской дневной поверхности в случае анизотропной среды // Новое в методике и технике геол.-разв. работ. Сб.1. М., Гостоптехиздат, 1958. С.210-235.

66. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ геофизических данных / Под ред. Ф.М. Гольцмана. Л. 1981. 255 с.

67. СТРАХОВ В.Н. О решении обратной задачи в методе ВЭЗ // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. N4. С. 15-20.

68. СТРАХОВ В.Н., КАРЕЛИНА Г.Н. Об интерпретации данных ВЭЗ на ЭВМ // Прикладная геофизика. Вып.56. М., Недра. 1969. С.118-129.

69. ТАРХОВ А.Г., БОНДАРЕНКО В.М., НИКИТИН А.А. Комплексирование геофизических методов. М., Недра. 1982. 293 с.

70. ТИХОНОВ А.Н., ГЛАСКО В.Б., ДМИТРИЕВ В.И. Математические методы в разведке полезных ископаемых. М., Знание. 1983. 63 с.

71. ФИЛАТОВ В.А. Два метода вычисления кажущегося сопротивления двухслойного геоэлектрического разреза // Геология и геофизика. 1979. N 7. С. 135-142.

72. ФОРСАЙТ ДЖ., МАЛЬКОЛЬМ М., МОУЛЕР К. Машинные методы математических вычислений. М., Мир. 1980. 280 с.

73. ФРОЛОВ В.Х. О возможности повышения геологической эффективности электроразведки. Изв. вузов, сер. Геология и Разведка. 1989. N 1. С.100-108.

74. ХМЕЛЕВСКОЙ В.К. Электроразведка. М., 1984. 420 с.

75. ХМЕЛЕВСКОЙ В.К. и др. Методы сопротивлений при изучении таликовых зон // Тез. докл. на Всесоюз. совещ. по применению геофиз. в инж. геол., гидрогеол. и шахтной геологии. Донецк, 1987. С. 49-50.

76. ХУТОРЯНСКИЙ В.К. Повышение геологической эффективности интерпретации ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в неоднородных средах с помощью ЭВМ // Повышение эффективности геол. методов поиска и оценки местор. полезн. иск. на основе мат. моделей. Новосибирск, 1986. С.111-117.

77. ЧАНТУРИШВИЛИ Л.С. Специальные задачи электрораз-

ведки при проектировании дорог. М., 1983. 170 с.

78. ШЕВНИН В.А. Опыт использования ЭВМ в учебном процессе по электроразведке // Изв.вузов. Сер. Геол. и Развед. 1985. N12. С. 108-111.

79. ШЕВНИН В.А., РАКУТУХАНИ Ф. Система расчета и тестирования линейных фильтров для решения прямой задачи электрических зондирований // Мат. XVIII научной конф. мол. ученых. Секц. "Геофизика". М., МГУ, 1992. Деп. в ВИНТИ, рег. N 588-B92. 24 с.

80. ШЕВНИН В.А., РАКУТУХАНИ Ф. Изучение анизотропии негоризонтальных напластований с помощью круговых наблюдений методом сопротивлений / Мат-лы XIX науч. конф. мол. уч. геол. ф-та МГУ. Секц. Геофизика. М. МГУ. 1992 г. Деп. в ВИНТИ, N 3262B-92.

81. ШЕЙНМАНН С.М. Элементы теории электроразведки анизотропных сред // Мат-лы ВСЕГЕИ, сб.9-10. М., 1941. С. 105-144.

82. ШЕМШУРИН В.А., УВАРОВ А.А. О геофизических методах определения фильтрационных свойств песчано-глинистых пород // Информ. бюлл. ЦТИСИЗ. М. 1970. N2. С. 39-43.

83. ШКАБАРНЯ Н.Г. Автоматизированная интерпретация кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП в рудных районах // Разведка и охрана недр. 1986. N11. С. 40-45.

84. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ геологической среды / Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. Ч.1. М., 1988. 176 с. Ч. 2. М. 1992. 200 с.

85. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА. Справочник геофизика. М., Недр. 1989. Кн.1. 438 с.; Кн.2. 378 с.

86. ЭПОВ М.И., ДАШЕВСКИЙ И.Н., ЕЛЬЦОВ И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, 1990. 29 с.

87. ЯКОВЛЕВ А.Г., МОДИН И.Н. Моделирование электрического поля в неоднородных средах методом интегральных уравнений // Тез. докл. 10-го Всесоюз. науч.-техн. семинара. М., ВСЕГИНГЕО. 1989. С. 58-60.

88. ЯКОВЛЕВ А.Г. и др. Пакет программ решения прямых задач электроразведки методом сопротивлений и вызванной поляризации // Тез. докл. 10-го Всесоюз. науч.-техн. семинара. М., ВСЕГИНГЕО. 1989. С. 60-61.

89. ЯКОВЛЕВ А.Г. Влияние геоэлектрических неоднород-

ностей на результаты электромагнитных зондирований // Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. М., 1989. 17 с.

90. ЯКУБОВСКИЙ Ю.В. Электроразведка. М., 1980. 384 с.

91. ЯНОВСКАЯ Т.Б., ПОРОХОВА Л.Н. Обратные задачи геофизики. Л. 1983. 210 с.

92. ANDERSON W.L. Computer program numerical integration of related transforms of order 0 and 1 by adaptive digital filtering. Geophysics, 1979, vol.44, No.7. P. 1287-1305.

93. BERDICHEVSKY M.N., VANYAN L.L., DMITRIEV V.I. Methods used in the USSR to reduce near-surface inhomogeneity effects on deep magnetotelluric sounding. Phys. Earth Planet. Inter., 1989. Vol.53, p.194-206.

94. MODIN I.N., PERVAGO E.V., SHEVNIN V.A. et al. Distortions of VES data, caused by subsurface inhomogeneities. Presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, June 6-10, 1994. (P129)

95. I.N.MODIN, V.A.SHEVNIN, E.V.PERVAGO. Vector measurements in resistivity prospecting. Presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, June 6-10, 1994. (P126)

96. JOHANSEN H.K. An interactive computer-graphic-display terminal system for interpretation of resistivity soundings // Geophys. Prospect. 1975. Vol.23. N3. P. 449-458.

97. JOHANSEN H.K. A man/computer interpretation system for resistivity soundings over a horizontally stratified earth // Geophys. Prospect. 1977. Vol.25. N4. P. 667-691.

98. NEGI J.W. and SARAF P.D. Anisotropy in Geoelectromagnetism. Elsevier, 1990. 238 p.

99. ZOHDY A.A.R. Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar-Zarrouk functions // Geol. Survey Bulletin. 1313-E, Washington, 1975. 92 p.

100. ZOHDY F.F.R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves // Geophysics. 1989. Vol.54. N2. P. 245-253.