

Издательство  
Московского  
университета



ГЕОЛОГИЯ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

---

МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

---



---

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. - 160 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 [ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ..., 1988, 1992]. 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, зондирований 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 иде-

ально 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).

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

## 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  $\rho_v$  и пористость породы:

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

где  $\rho_n$  - УЭС породы, а  $P$  - параметр пористости, связанный с коэффициентом пористости  $n$  соотношением  $P = a/n^m$ ,  $a$  - 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:

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

где  $P_n$  - параметр пористости,  $P_v$  - параметр влажности,  $P_m$  - параметр, учитывающий наличие электропроводящих минералов,  $P_p$  - параметр, учитывающий поверхностную проводимость (глинистость),  $V_d$  - параметр зернистости,  $P_t$  - параметр температуры,  $\rho_v$  - 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 факторами. 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 грунтово-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 ( $\rho_v$ , 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 заполнителем 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,  $w_1 = 1 - k(1 - n)$ ,  $k$  - отношение объема основной (крупной) фракции ко всему объему скелета грунта (д.е.);  $\rho_1$  - удельное электрическое сопротивление заполнителя (Ом.м);  $n$  - пористость (д.е.).

В свою очередь заполнитель также рассматривается как биминеральная среда, где включениями служат мелкие 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.),  $w_2 = [n + C_{гл}(1 - n)] / [1 - k(1 - n)]$  где  $C_{гл}$  - 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  $\rho_3$  - удельное электрическое сопротивление заполнителя (Ом.м);  $d\rho = \rho_3 - \rho_{гл}$ ;  $\rho_{гл}$  - сопротивление глинистых частиц, покрытых связанной водой (двойным электрическим слоем);

$A = abcA(0)w_3 d\rho + 2\rho_{гл}$ ,  $B = abcB(0)w_3 d\rho + 2\rho_{гл}$ ,  $C = abcC(0)w_3 d\rho + 2\rho_{гл}$ , где  $w_3$  - относительное объемное содержание заполнителя (д.е.). Выражения  $abcA(0)$ ,  $abcB(0)$ ,  $abcC(0)$  зависят только от отношения полуосей эллипсоидов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и для подобных эллипсоидов одинаковы.

А.В.Тимохиным разработан пакет программ "Kobra" 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, состоящей из твердого скелета, системы пор определенного размера, заполненной полностью или частично водными растворами солей и глинистых частиц, которые могут находиться как на стенках пор в виде пленок, так и в самих порах в виде пробочек [Рыжов, 1987; Рыжов, Судоплатов, 1990]. 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:

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

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

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

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_n$  (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;  $U_a$ ,  $U_k$  (м<sup>2</sup>/с. В) - подвижность анионов и катионов,  $C_{kn}$ ,  $C_{an}$  (моль/м<sup>3</sup>) - концентрация катионов и анионов вдоль направления, совпадающего с направлением радиуса в пассивном капилляре;  $C_{ka}$ ,  $C_{aa}$  - то же в активном капилляре, все  $C$  - функции  $r$ ,  $N$  - число гидратации для конкретного катиона вещества, находящегося в водном растворе;  $\eta$  (%) - 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  $C_{ki}$ ,  $C_{ai}$ , ( $i \in k,a$ ), входящих в формулы (5,6) используется формула Больцмана:

$$C_{ki}(x) = C_{k0} \cdot \exp\left(\frac{-ZF}{RT} \cdot \psi(x)\right), \quad (8)$$

$$C_{ai}(x) = C_{a0} \cdot \exp\left(\frac{-ZF}{RT} \cdot \psi(x)\right), \quad (9)$$

где  $C_{k0}$ ,  $C_{a0}$  (моль/м<sup>3</sup>) - 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:

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

где  $\psi_1$  - потенциал Штерна (В);  $k = \sqrt{2CZF / \varepsilon RT}$  - величина обратная дебаевскому расстоянию (м<sup>-1</sup>);  $x$  - расстояние от стенки капилляра (м),  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость. Так как  $Z$ ,  $F$ ,  $R$ ,  $T$ ,  $\psi$ ,  $k$ ,  $x$  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  $\psi_1$  - потенциала для заданной концентрации электронейтрального раствора вычислялось путем решения системы нелинейных уравнений относительно  $\psi_1$  потенциала:

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

$$\Gamma_k = \Gamma_{0k} \cdot \frac{N \cdot \exp(-\Phi_k \pm ZF\psi_1 / RT)}{1 + N \cdot \exp(-\Phi_k \pm ZF\psi_1 / RT)}, \quad (12)$$

где  $\Gamma_k$  - степень адсорбции ионов на поверхности, моль/м<sup>2</sup>;  $\Gamma_{0k}$  - предельное число мест адсорбции ионов на единице поверхности, моль/м<sup>2</sup>,  $\Phi_k = ZF\psi_k/RT$  - безразмерный потенциал, характеризующий потенциал  $\psi_k$  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:  $\Gamma_{0k} = 3.5 \times 10^{-7}$  (моль/м<sup>2</sup>);  $\Phi_1 = 0$ ;  $N = 1$ ;  $M = 1$ .

На рис.1.1.1 изображено строение двойного слоя  $C_k = f(x, c)$ ,  $C_a = f(x)$  и изменение электрического потенциала  $\psi$  в зависимости от расстояния  $x$  от стенки капилляра (в ангстремах, 1 ангстрем =  $10^{-10}$  м) и концентрации  $C_0$  электронейтрального раствора. Расчеты выполнены по формулам 8-12.

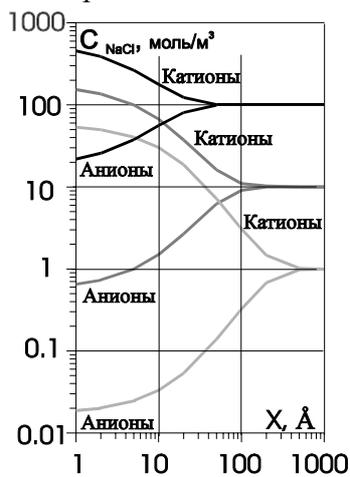


Рис.1.1.1. Структура двойного электрического слоя

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

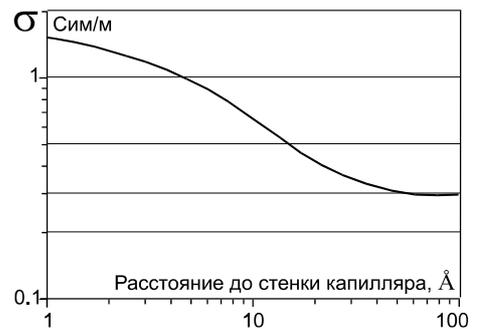


Рис.1.1.2. Зависимость  $\sigma$  от расстояния до стенки капилляра

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, удельная электропроводность 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/м<sup>3</sup>) влиянием двойного слоя можно пренебречь (и пользоваться при расчетах УЭС породы более простой формулой).

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  $r_P$ , а радиус капилляров в глинах  $r_G$ . В природе радиусы пор (капилляров) распределены в некотором интервале, который можно

охарактеризовать законом распределения, средними значениями и дисперсией. В этом случае радиусы  $r_{II}$  и  $r_I$  можно понимать как средний (эффективный) радиус. Пусть пористость песка  $K_{II}$ , глины  $K_I$ , и глина "размазана" по стенкам капилляров песка (1 тип) или глина находится в капиллярах в виде пробочек, перегородивающих внутреннюю часть поры песка (2 тип). Электропроводность смеси в первом случае будет:

$$\sigma_{\Sigma 1} = \sigma_n(1 - C_r) + C_r(\sigma_r + \sigma_{r0}), \quad (13)$$

а во втором случае:

$$\sigma_{\Sigma 2} = \frac{1}{\frac{(1 - C_r)}{\sigma_n} + \frac{C_r}{\sigma_r + \sigma_{r0}}}, \quad (14)$$

где  $\sigma_{\Sigma 1}$  - удельная электропроводность смеси песка с глиной, См/м;  $\sigma_n$  - удельная электропроводность песка, рассчитанная по формуле (5);  $\sigma_r$  - то же, но для глины;  $\sigma_{r0}$  - 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/м<sup>3</sup>. 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  $\sigma_{\Sigma}$  - удельная электропроводность сложной смеси 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  $K_{II}=0.55$ ,  $r_1=0.005$  мкм, для песка  $K_{II}=0.25$ ,  $r_1=0.1$  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

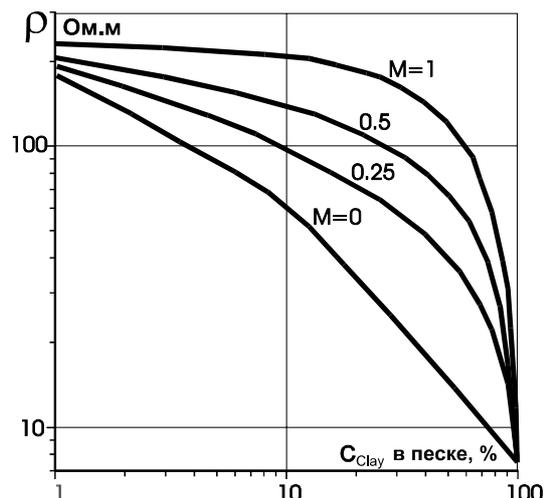


Рис.1.1.3. Зависимость УЭС смеси песка с глиной от  $M$  и  $C_{гг}$

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 М 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  $K_{п}=0.25$ ,  $r=0.1$  мм; для глины  $K_{п}=0.55$ ,  $r=0.005$  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 других типов вод (сульфатно-магневых, 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 -  $\rho_1$ . 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,

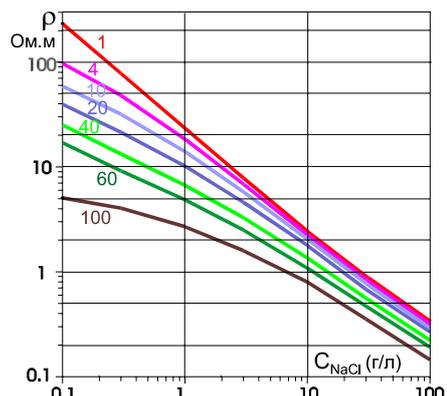


Рис.1.1.4. Зависимость УЭС смеси песка и глины от  $C_{NaCl}$

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 . 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 (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 электропрофилирования. Общим случаем двумерной модели является разрез с произвольным распределением , в котором  $\rho$  может являться как кусочно-постоянной функцией  $\rho=f(X, Z)$ , так и непрерывной (градиентной).

Наиболее сложная фундаментальная геоэлектрическая модель - трехмерная, когда  $\rho=f(X, Y, Z)$  (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 (профилированием или зондированием). Эта классификация моделей и применяемых

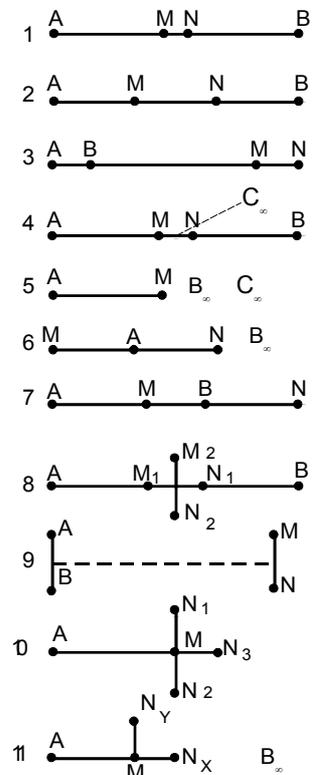


Рис.1.3.1. Виды установок метода сопротивлений

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 (А,В) и приемных (М,Н) электродов. Выбор установки является важнейшим элементом методики электроразведки методом сопротивлений и зависит от геологических 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 (АМ), трехэлектродные (АМН, МАН), четырехэлектродные (АМНВ, АВМН 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 АМ, 6) установка МАН ( $MA = AN$ ), 7) установка В.Х.Фролова [Фролов, 1989], 8) установка "метода двух составляющих" (МДС) А.Н.Боголюбова [Боголюбов и др., 1984], 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" [Рабинович, Кежутин, 1962]:

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

По этой же методике могут трансформироваться кривые ВЭЗ.

Метод сопротивлений используется для трех основных видов 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  $\lambda$ , а вторая - пропорциональный  $\lambda^5$  (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). 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 установке ДОП почти вертикально. Поэтому вертикальный пласт высокого сопротивления сильнее проявится в установке СЭП, а проводящий пласт - в

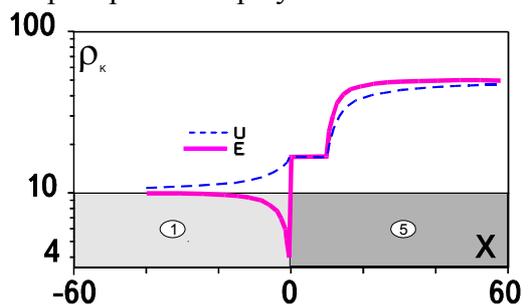


Рис.1.3.2. Графики ЭП над вертикальным контактом для установок АМ (U) и АМН (E)

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:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r}; \quad E = \frac{I\rho}{2\pi r^2}. \quad (17)$$

Из этих формул легко определить истинное сопротивление однородного полупространства. Эта величина в случае неоднородных сред получила название кажущегося сопротивления:

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

Кажущееся сопротивление в методе сопротивлений рассчитывается по единой для разных установок формуле  $\rho_k = K \cdot \Delta / I$ , 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  $\rho_{MN}$  - 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  $\rho_{MN}$ , а заставляя ток обтекать

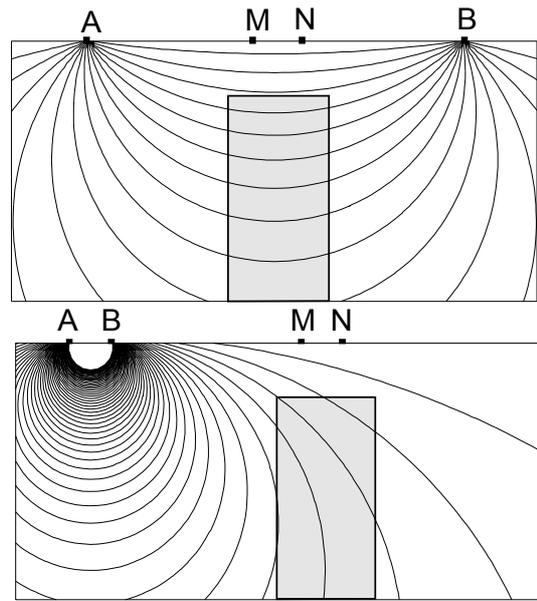


Рис.1.3.3. Сравнение установок СЭП (вверху) и ДОП (внизу)

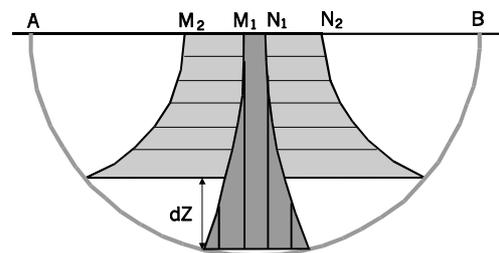


Рис.1.3.4. Эффект управления глубиной с помощью MN.

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 разности питающих электродов  $AB$  в установке Шлюмберже или расстояния между диполями  $r=OO'$  в дипольных установках. Рост фактора глубинности здесь также сопровождается ростом  $K$ .

В.Х.Фролов (г.Новосибирск, СНИИГГИМС) предложил оригинальные фокусирующие установки для ЭП и зондирования:  $AMB_N$  [Фролов, 1989]. 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 уровню нормального поля  $dU$  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 составляющих (МДС), предложенная А.Н.Боголюбовым [Боголюбов и др., 1984]. 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 зондирования трехэлектродную двухстороннюю (или комбинированную) установку, предложенную А.С.Семеновым. Конечно необходимость организации заземления в "бесконечности" создает немало осложнений, но преимущества при выполнении зондирования 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  $C$ -эффект) (см. главу 3). Для выявления и последующего устранения  $C$ -эффекта желательна установка 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 детальном малоуглубинном исследовании. При изучении больших глубин установка АМ неудобна из-за нарастающего влияния помех и наличия двух линий бесконечности. Появление многоканальных автоматизированных аппаратурных 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  $\rho_K$  определенной установкой. Минералы и руды обладают очень широким диапазоном УЭС (от  $10^{-5}$  до  $10^{+15}$  Ом.м). Большинство горных пород являются ионопроводящими и их УЭС определяются количеством и проводимостью влаги, заполняющей поры горных пород. Значения  $\rho$  горных пород меняются в более узких пределах: от первых долей до  $10^{+6}$  Ом.м. На небольших участках в конкретных условиях диапазон  $\rho$  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):

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

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

Источники электрического поля в этих уравнениях делятся на две части. К одной относятся сторонние силы  $q_{ct}$ ,  $\partial q_{cm} / \partial t$ , 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  $\rho_K$ . При этом ошибка считывания одинакова в любой части графика. При изображении графиков  $\rho_K$  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  $|K$  путем построения гистограмм и графиков накопленных частостей на вероятностном бланке показали, что выборки  $\rho_K$  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  $\rho_k$  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 влаги. Все факторы в этой формуле оказываются сомножителями (мультипликативный закон). Сильнее всех на значения УЭС влияют  $\rho$  воды и параметр пористости, что отражает формула Арчи: В свою очередь, 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  $\rho_k$  с логнормальным законом - благодаря зависимости  $\rho$  от логнормально распределенных параметров.

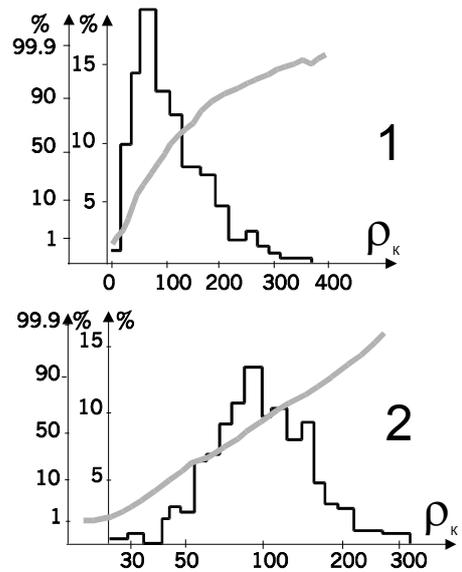


Рис.1.4.1. Гистограммы и ГНЧ для сравнения с  $N(1)$  и  $LN(2)$  законами распределения  $\rho_k$ .

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  $\rho_k$  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 ситуации. По ЭП выделяется 5 участков. Первый и пятый имеют одинаковое сопротивление. Дисперсия значений  $\rho_k$  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.

к снижению эффективности

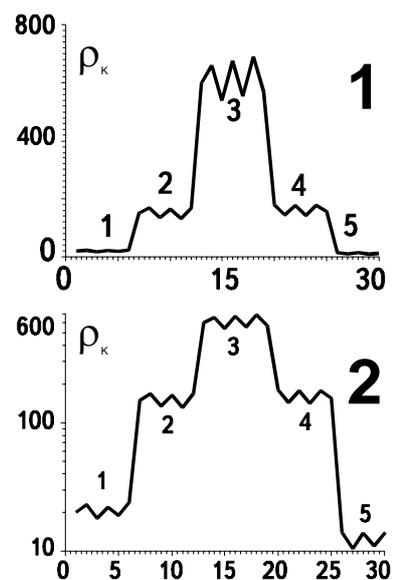


Рис.2. Графики ЭП в линейном (1) и логарифмическом (2) масштабе по оси  $\rho_k$ .

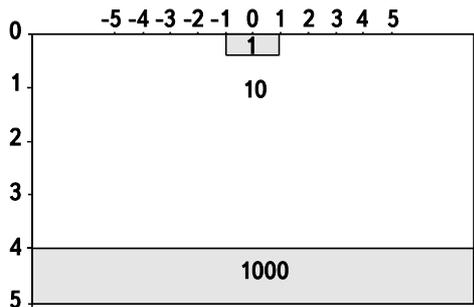


Рис.1.4.3. Модель среды с ППН.

На рис. 1.4.3 - 1.4.5 приведен 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.1.4.4-1) могут привести к заключению о возрастании амплитуды аномалии с ростом разноса и, следовательно, о глубинном расположении источника аномалии. Графики ЭП в логарифмическом масштабе (рис. 1.4.4-2) показывают, что амплитуда

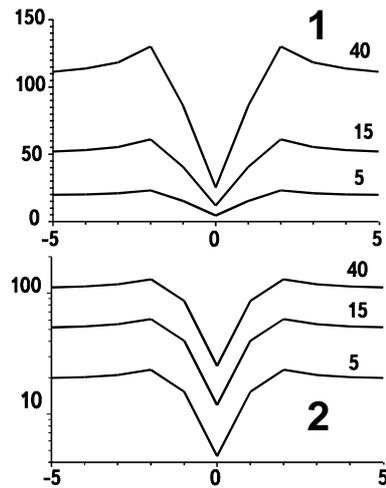


Рис.1.4.4. Графики ЭП для модели с рис.1.4.3.

аномалии одинакова для всех разносов. По данным зондирований над этой моделью на разрезе  $\rho_K$  (рис.1.4.5) выявляется зона пониженных значений  $\rho_K$  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.

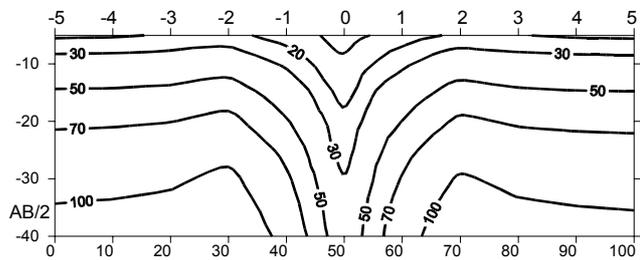


Рис.1.4.5. Разрез  $\rho_K$  по ВЭЗ над моделью с рис.1.4.3.

Учитывая приведенные факты можно сделать вывод, что подчинение выборок значений истинного и кажущегося сопротивления логнормальному закону является не случайным 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  $\rho$  следует брать логарифмический масштаб.

2. При оценке погрешностей следует использовать относительные, а не абсолютные величины. (В настоящее время это общепризнанно 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  $\rho_K$ , что соответствует постоянству относительной погрешности съемки; б) в едином масштабе удается охватить любой диапазон изменения  $\rho_K$ ; в) достигается равенство амплитуд аномалий для разрезов с одинаковой относительной разницей свойств, но разным уровнем  $\rho$ ; 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  $\rho_k$ . 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  $\rho_k$ .

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  $\rho_k$  следует сопоставлять в алгоритме МНК не **абсолютные** ( $\rho_k^{(1)} - \rho_k^{(2)}$ ), а **относительные** ( $(\rho_k^{(1)} - \rho_k^{(2)}) / \rho_k^{(cp)}$ ) разности полей.

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

### 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 - Recesspect. Количество измерительных каналов 480. Каждые 16 каналов подключены к отдельному микропроцессору, которые в свою очередь передают данные компьютеру станции. Технология Recesspect 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 OYO 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 электропрофилеирование с двухэлектродной потенциал-установкой AM 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 становления поля, магнитотеллурических, частотных зондирований, метода сопротивлений (профилеирования 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 электропрофилеирования 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 км<sup>2</sup> 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

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

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  $m$ . 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 [Филатов, 1979] 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  $\rho_2/\rho_1$  ( $10^{-4} \div 10^4$ ) необходимо использовать достаточно большое число членов соответствующих бесконечных рядов, а затем к полученному результату прибавлять поправку, эквивалентную отброшенным членам ряда.

Ю.А.Дашевский [1982] 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  $\rho_K$  в том числе больших разносов ( $r/h \geq 130$  тыс.) при высокой контрастности разреза ( $10^{-3} < \rho_2/\rho_1 < 10^4$ ).

А.А.Рыжов [Рыжов, Каринская, 1981] предлагает вычислять интеграл (1) как сумму произведений ядра  $mR_1(m)$  на коэффициенты  $D_i$ , заранее вычисленные для каждого разноса  $r$ . Если имеется интеграл

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

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

$$I_n = \int_a^b \varphi_1(z) \cdot J_1(az) dz, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Алгоритм численного интегрирования можно записать в виде

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

Значения коэффициентов  $D_i$  для каждого разнота  $r_j$  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 зондирований - 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.Кунетцем (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, Н.К. 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:

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

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  $\rho_K(r)$  в виде интеграла Ханкеля (1) обратимо, и по кривой  $\rho_K(r)$  может быть рассчитана трансформанта  $R_1(m)$  проще связанная с параметрами разреза.  $R(m)$  допускает последовательное 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 [Статистическая интерпретация, 1981], его сотрудников и учеников (Т.Б.Калинина, Л.Н.Порохова [Порохова и др., 1987; Яновская, Порохова, 1983] 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 [1984]. 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 [Жданов, 1986; Заборовский, 1963; Хмелевской, 1984] (см. ф-лу 1): где  $R_1(m)$  носит название трансформанты или кернел-функции. В случае трехслойного разреза формула для  $R(m)$  имеет вид:

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

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:

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

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  $\rho_K$  с ростом  $g$ .

### 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 абсцисс (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 [Anderson, 1979], 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  $\alpha$ . Это множитель, близкий к единице (или равный ей), характеризующий сдвиг узлов сетки  $X$  относительно ближайших узлов сетки  $g$ . Для некоторых фильтров он равен 1, т.е. узлы сеток  $g$  и  $X$  совпадают, для других фильтров отличается от 1 в большую или меньшую сторону. Впервые D.P.Ghosh показал, что правильный выбор  $\alpha$  помогает уменьшить число коэффициентов фильтра [Куфуд, 1984].

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  $G$ , желательно 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 разносов  $g$  в логарифмическом масштабе. Ниже ее, также в логарифмическом масштабе, - ось  $X=1/m$ . При расчете значения  $\rho_K$  для одного разноса  $g$  требуется рассчитать  $KF$  значений кернел-функции  $R$  для сетки значений  $X$ , возрастающих в геометрической прогрессии с коэффициентом  $q$ , определяемым

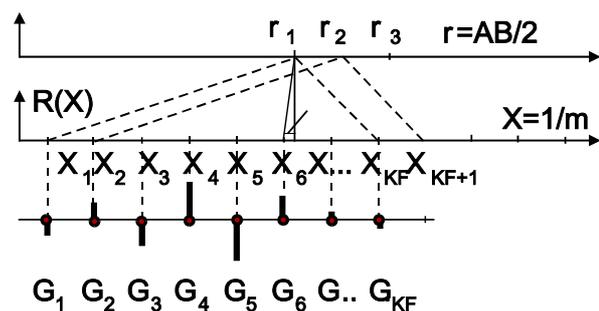


Рис.2.2.1. Принцип алгоритма линейной фильтрации.

параметром  $KTM$  данного фильтра. Ближайшее к данному разносу  $g$  значение  $X$  соответствует центральному коэффициенту фильтра. Справа от центрального располагаются коэффициенты предсказания, а слева - коэффициенты памяти. Разница между значениями  $g$  и центральным  $X_C$ , называется сдвигом  $\alpha$ . ( $\alpha = X_C / g$ ). Зная число коэффициентов слева от центра ( $M$ ) можно рассчитать положение первой точки  $X$  относительно  $g$  по формуле:

$$X_1 = r \cdot \alpha / q^M \quad (9)$$

Легко видеть из рис. 2.2.1, что рассчитывая  $\rho_K$  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 разнosa. Если для  $\rho_K$  ( $r_1$ ) потребуется  $KF$  значений  $R$ , то для  $NR$  разносов, возрастающих в той же геометрической прогрессии, потребуется  $KF+NR-1$  значений. Если же сетка разносов произвольная, то для расчета  $\rho_K$  на  $NR$  разносах потребуется уже  $(KF \times NR)$  значений  $R$ .

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  $\rho_K$ , уровень фона не менялся.

#### 4. Основные элементы алгоритма линейной фильтрации

Программа для расчета  $\rho_K$  с помощью линейного фильтра должна включать следующие операции:

а) ввод исходных данных о модели (число слоев  $NS$ , их удельные сопротивления  $\rho$  и мощности  $h$ ), сведений о разносах (их число  $NR$  и первое значение  $r_1$  или весь список разносов, если они произвольные), и значений параметров фильтра ( $KF$ ,  $KTM$ ,  $\alpha$ ,  $M$  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 кернел-функции  $R$  или трансформанты

$T = \rho_1 R$  по рекуррентной формуле. Обычно используется рекуррентная формула Пекериса [Куфуд, 1984]:

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

или Л.Л.Ваньяна:

$$R_N = 1, \quad R_i(X_j) = \frac{1 - F_{i+1}}{1 + F_{i+1}}, \quad \text{где}$$

$$F_{i+1} = \frac{1 - \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \cdot R_{i+1}}{1 + \frac{\rho_{i+1}}{\rho_i} \cdot R_{i+1}} \cdot \exp\left(-\frac{2h_1}{X_j}\right), \quad (11)$$

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

- е) расчет значений  $\rho_K$  по формуле (7);  
 ж) запись результатов.

Подробнее об алгоритме и программах линейной фильтрации можно прочесть в [Куфуд, 1984; Электрическое зондирование, 1992].

### 5. Расчет фильтров на основе метода наименьших квадратов

Несмотря на большое количество опубликованных фильтров, время от времени возникает потребность в их расчете:

- а) иногда требуются более точные фильтры,
- б) требуются фильтры для иной установки,
- в) требуются фильтры с иными параметрами (KF, KTM),
- г) расчет фильтра представляет самостоятельный интерес.

Нами создана программа FILTER, предназначенная для расчета коэффициентов линейных фильтров, преобразующих kernel-функцию R в кажущееся сопротивление  $\rho_K$ . Ее прототип взят из книги О.Куфуда [1984], программа 5.5.1, стр.74-77.

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

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

где  $\rho_K$  - известная функция кажущегося сопротивления, а G - неизвестные коэффициенты линейного фильтра.

Условие минимума  $\Phi$ :

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

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

Так как получить точную функцию кажущегося сопротивления для подстановки в (12) затруднительно, то вместо функций R и  $\rho_K$  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 [Куфуд, 1984]), если вместо R взять:

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

а вместо  $\rho_K$  функцию:

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

где значения r, начиная с начального  $r_H$  возрастают с тем же шагом q, что и m (значения m и r в формулах 14-19 безразмерные, см. [Куфуд, 1984]):

$$r_H = \frac{m_{МИН}}{\alpha \cdot q^L}, \quad (16)$$

где L - число коэффициентов предсказания. Это дает возможность рассчитать фильтр для установки Шлюмберже (см. [Куфуд, 1984], с.82-87).

Меняя выходную функцию  $\rho_K^*$ , 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  $\rho_K$  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  $\rho_K$  для ДОЗ (D):

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

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 книге [Куфуд, 1984] приводятся и другие аналоги функций R и  $\rho_K$ .

Работа программой показала, что чисто автоматический режим ее работы весьма неудобен. Поэтому в программе была предусмотрена возможность расчета фильтров в режиме диалога при подборе параметров фильтра по критерию минимальной погрешности расчета  $\rho_K$ . В процессе диалога можно менять число коэффициентов фильтра, соотношение коэффициентов предсказания и памяти, сдвиг  $\alpha$ , 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 разностям является основным внутренним критерием качества фильтра. Другой важный критерий - сумма коэффициентов фильтра. Можно рассчитывать фильтры для установки Шлюмберже, Веннера, ДОЗ,

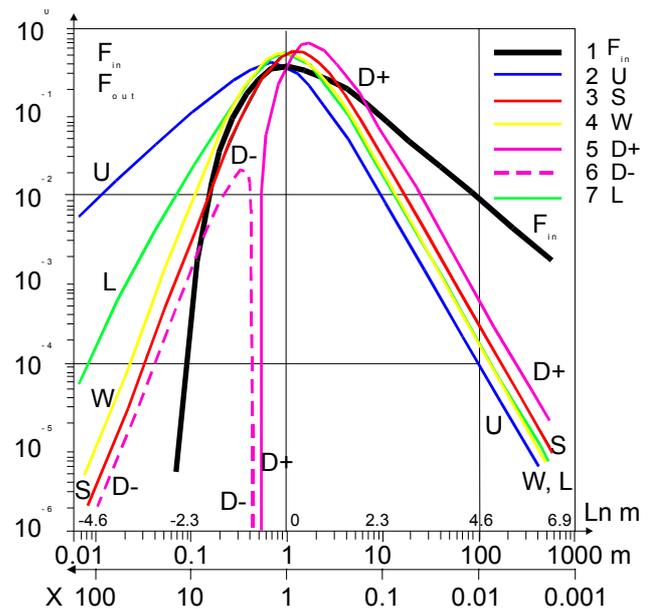


Рис.2.2.2. Входная и выходные функции фильтров для разных установок.

двухэлектродной потенциал - установки АМ и установки с линейными питающими электродами.

## **6. Работа с программой FILTER**

Опыт работы с программой FILTER показал, что минимизации 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 внутренних оценок 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  $|K|$ , 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 разnose 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 России -  $AB/2$ , 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 [Жданов, 1986; Хмелевской, 1984; Электрическое зондирование, 1988]. 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):

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

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

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

для установки Веннера (W):

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

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

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

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  $dS / S < \varepsilon$ , то суммирование можно закончить. Количество членов ряда, достаточное для достижения условия сходимости зависит от разности (и растет с ростом  $\gamma$ ) 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 по мощью 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  $\rho_K$  превышают 20%. Для более точного контроля необходимо сопоставление результатов в цифровой форме.

Для тестирования нужно было выбрать модели разрезов и систему разносов. Мы использовали сетку разносов: 0.5 - 1024 м с коэффициентом прогрессии 2, предложенную В.А.Филатовым [1979]. В качестве эталонов использовались двухслойные кривые ВЭЗ.

При перекрестной проверке фильтров и других алгоритмов расчета для установки Шлюмберже на модели В.А.Филатова с  $\rho$ : 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  $\rho$ : 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 рисунке визуально не отличаются результаты программ Дашевского Д-1 и Д-2 [Дашевский, 1982], расчеты авторов (МГУ [Рогова, Яковлев, 1992; Шевнин, Ракутухани, 1992; Электрическое зондирование, 1992]) и Абрамовой (А-15 [Абрамова, 1985]). 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 [Куфуд, 1984].

В таблице 1 за эталон приняты расчеты В.А.Филатова. Для компактности таблицы значения  $\rho_k$  приведены лишь для программы эталона, а для других программ даны относительные погрешности на каждом разноре 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 [Рогова, Яковлев, 1992], Д-1 - программа Дашевского для идеальной установки Шлюмберже.

Интересно отметить, что расчет по программе Р-Я [Рогова, Яковлев, 1992] точнее, чем А-15 [Абрамова, 1985], хотя использует тот же фильтр. Это достигается прежде всего интегрированием поля в пределах MN. Фильтр Куфуда и Диркса [Куфуд, 1984] 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  $\rho_k$  превышает 25.

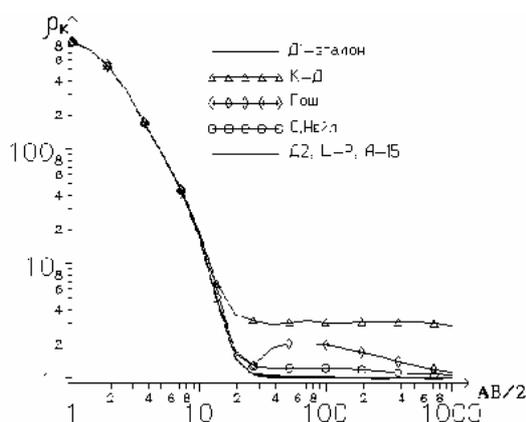


Рис.2.2.3. Сравнение кривых ВЭЗ типа Q для расчетов с разными фильтрами.

Таблица 1

СОПОСТАВЛЕНИЕ КРИВЫХ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ШЛЮМБЕРЖЕ  
МОДЕЛЬ: СОПРОТИВЛЕНИЯ СЛОЕВ 1.0 - 0.0001; МОЩНОСТЬ 1.0.

AB/2	$\rho_k$ - 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	.843345	.252	.267	.022	.065	.002	.010	.007	.052
2	.427556	.396	-.556	.043	.595	.006	.020	.057	.052
4	.049736	4.130	4.250	.370	.788	.097	.149	-.072	-.052

8	.000361	620.222	13.573	57.895	7.147	6.648	10.803	-2.216	-.277
16	.000101	1969.30	800.99	216.83	26.238	-5.941	18.812	-7.921	.139
32	.000100	1990.00	440.00	240.00	13.300	22.00	20.00	2.000	.000
64	.000100	2150.00	1160.00	240.00	6.600	25.00	10.00	-1.000	.000
128	.000100	2050.00	860.00	230.00	3.300	15.00	0.0	-1.000	.000
256	.000100	2110.00	470.00	170.00	1.600	8.00	0.0	-1.000	.000
512	.000100	2100.00	240.00	90.000	.800	4.00	0.0	.000	.000
1024	.000100	1770.00	120.00	50.000	.400	2.00	0.0	.000	.000

Аналогично были проведены расчеты для установки Веннера, ДОЗ, двухэлектродной потенциал - установки АМ и установки с линейными электродами. Результаты опубликованы в [Шевнин, Ракутухани, 1992].

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 разностям 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 разностей при  $\rho_2=10000$ .

Таблица 2

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

Установка	KF	ПОГРЕШНОСТЬ ВНЕШНЯЯ. МОДЕЛЬ: $\rho_1=1.0, N_1=1.0, \rho_2 - VAR$						
		$\rho_2$	.01	.001	.0001	100	1000	10000
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	10.85	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

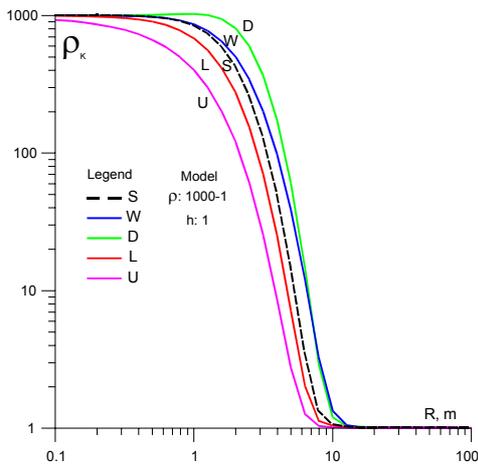


Рис.2.2.4. Кривые ВЭЗ над двухслойной моделью для 5 установок.

модели ( $\rho$ : 1000-1 и  $h$ : 1 м), трехслойных разрезов типа Н ( $\rho$ : 1000-2-1000,  $h$ : 1-20 м) и К ( $\rho$ : 1-200-1,  $h$ : 1-5 м). Кривые для 5 установок расположились по оси разносов слева направо в следующем

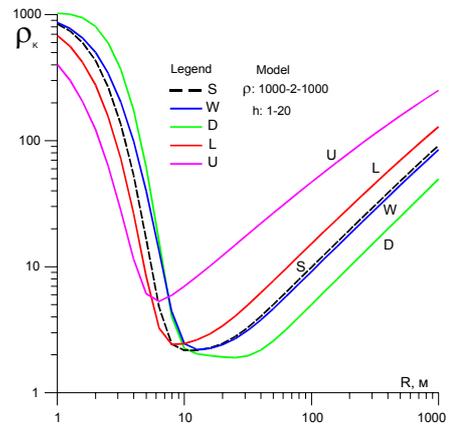


Рис.2.2.5. Кривые ВЭЗ типа Н для 5 установок.

порядке:

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 меньшей 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  $\rho_{\min}$  к  $\rho_2$  возрастают от U к D. Для оценки  $\rho$  проводящего слоя методом характерных точек это безусловно имеет значение, но для компьютерных способов интерпретации - несущественно.

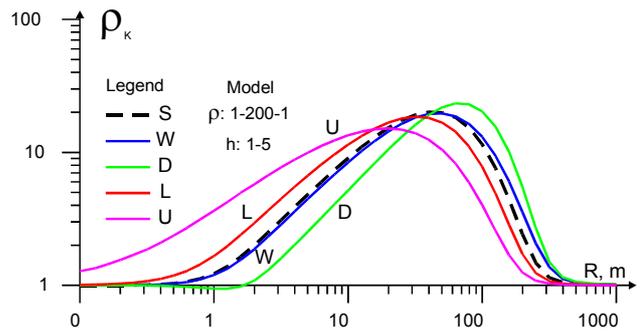


Рис.2.2.6. Кривые ВЭЗ типа К для 5 установок.

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

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 [Рогова, Яковлев, 1992] основан на том, что разность потенциалов между приемными электродами получается путем интегрирования напряженности электрического поля. Разность потенциалов  $\Delta U_{MN}$  представляется в виде:

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

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

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

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:

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

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, Веннера, 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 [В.П.Колесников,1981; О.Куфуд, 1984; Н.В.Мыщик, 1982; А.А.Рыжов, 1981; В.К.Хуторянский, 1986; Н.Г.Шкабарня, 1986; Н.К.Johansen,1975; А.А.Р.Зохды, 1975, 1984 и др.]. 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

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

или логарифмическую невязку

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

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

При малых невязках оба этих функционала совпадают.

Это следует из известного предела:  $\lim_{x \rightarrow 1} (x - 1) = \ln x$

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).

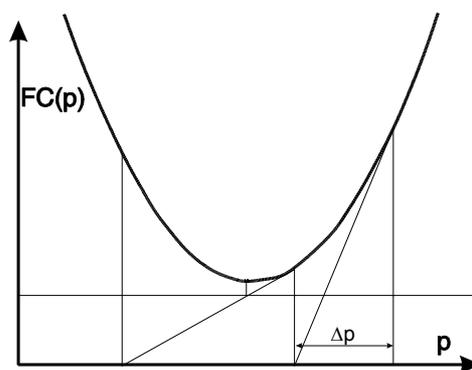


Рис.2.4.1. Идея метода наискорейшего спуска

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

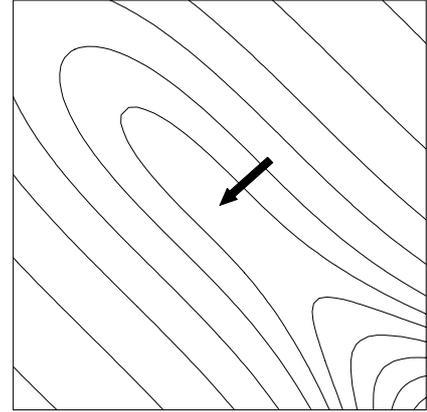


Рис.2.4.2. Пример локального псевдоминимума (указан стрелкой) для функции двух переменных

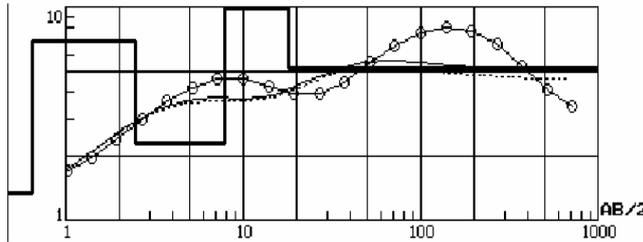


Рис.2.4.3. Пример остановки подбора в интерпретации локальном минимуме.

затруднительным использование метода наискорейшего спуска в программах автоматической

Идея метода Ньютона заключается в том что, в окрестности текущего приближения  $P_0$  прямая задача ВЭЗ заменяется вспомогательной линейной функцией:

$$\ln \rho_{k_j}^t(\bar{p}_0 + \Delta \bar{p}) = \ln \rho_{k_j}^t(\bar{p}_0) + \sum_{j=1}^{NP} \Delta p_i \cdot \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial p_i} \quad (31)$$

где NP - число подбираемых параметров;  $\Delta P$  - поправка в параметр.

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

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

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

$$\sum_{j=1}^{NR} \left( \ln \rho_{k_j}^{obs} - \ln \rho_{k_j}^t(\bar{p}_0) \right) \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial p_m} - \sum_{j=1}^{NR} \sum_{i=1}^{NP} \Delta p_i \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial p_m} = 0, \quad (33)$$

$$m = 1 \dots NP.$$

Эту систему уравнений можно переписать в матричном виде:

$$F^T \cdot F \cdot \Delta \bar{p} = F^T \cdot (\ln \bar{\rho}_K^{obs} - \ln \bar{\rho}_K^t) \quad (34)$$

где F - матрица частных производных  $\rho_K$  размером NP на NR:

$$F_{ij} = \frac{\partial \ln \rho_{k_j}^t}{\partial p_i}; \quad j = 1 \dots NR, i = 1 \dots NP. \quad (35)$$

Введя обозначения  $F^T F = A$  и  $F^T \Delta \rho_K = b$ , получим:  $A x = b$  (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 линейризация 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 нулевой вектор, т.к. из множества решений мы ищем решение достаточно близкое к начальной модели.

Доказано [Вычислительная..., 1982], 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 функции  $\rho_k$ . Причем для 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.

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

$$B \cdot x^i = b - C \cdot x^{i-1}$$

$$B x^i = b - C x^{i-1}, A=B+C$$

Рис.2.4.4. Идея решения СЛАУ методом Зейделя

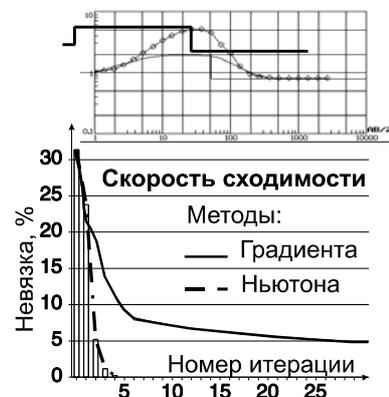
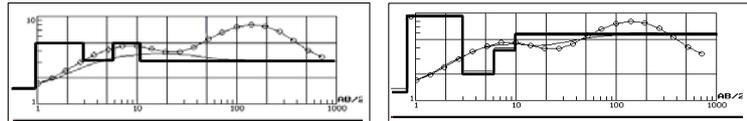


Рис.2.4.5. Сравнение скорости сходимости методов наискорейшего спуска и Ньютона

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 приближение - все мощности сильно занижены. Но использование метода Зейделя позволяет подобрать модель даже из такого плохого

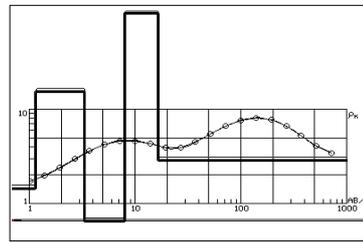


Рис.2.4.6. Пример подбора при плохом начальном приближении

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 [Модин, Березина и др., 1993; Электрическое зондирование, 1992].

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 интерпретации 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  $\rho$  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  $45^\circ$ ; 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. Интерпретация 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

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.

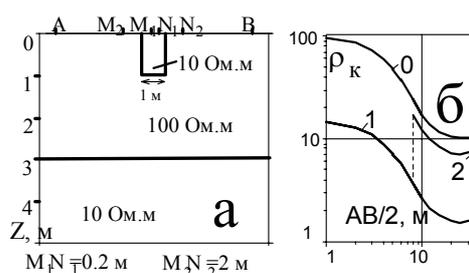


Рис.3.1.1. Проявление Р-эффекта на сегментированной кривой ВЭЗ

Объяснение Р-эффекта можно дать с помощью формулы:

$$\rho_k = K \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho_{MN} \cdot j_{MN}}{j_0} = \frac{E_{MN}}{j_0},$$

где главной причиной Р-эффекта следует считать изменение на приповерхностной неоднородности. Если кривая не сегментирована, 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 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 изолинии напоминают волнистую структуру. После нормализации кривых разрез выглядит как горизонтально-слоистый (рис.3.1.2,Г).

### 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 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 (Е - модель разреза; D - кривые ВЭЗ, искаженные С- эффектом; А,В - разрезы  $\rho_k$  для AMN и MNB установок, С - разрез  $\rho_k$  после устранения С- эффекта). Когда питающий электрод попадает в ППН.

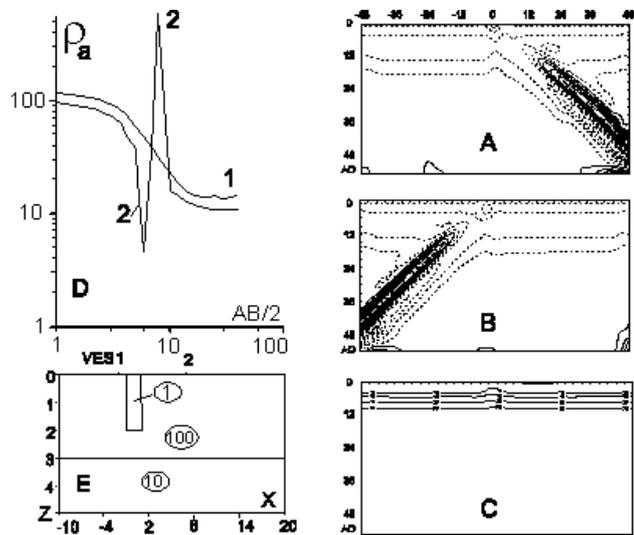


Рис.3.1.3. С-эффект для двухслойной модели с ППН.

искажается на 1-2 разносах за счет резкого перераспределения плотности тока в разрезе ( 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 как наклонный слой, причем с использованием логарифмического масштаба по оси

разносов он выглядит изогнутым; в) при стандартной методике зондирования с 4-х электродной установкой Шлюмберже и логарифмическим шагом увеличения разносов, 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  $\rho_K$  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 глубинность. 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 разносы 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 разносов не согласуется с принципами зондирования, но необходим для выявления приповерхностных неоднородностей. Искажения приповерхностными неоднородностями вблизи питающих электродов при увеличении разносов в геометрической прогрессии проявляются в поле  $\rho_K$  как случайная геологическая помеха, а при линейном увеличении разносов 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 диагностикой искажений.

#### **Визуализация данных ВЭЗ для новой методики измерений**

Изображение кривой ВЭЗ как зависимость 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  $\rho_K$  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  $\rho_K$  - вверху для AMN, внизу - для MNB (см. рис.3.4.2).

2. Дифференциально-разностная (или D) трансформация - вверху разница 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 разному) (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 картинке (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 [Вычислительная..., 1982]. 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 [1991]. 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 кажущегося 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,  $C$ -эффектом). Отбрасывание высокочастотных компонент приводит к значительному сглаживанию поля.

В течение ряда лет мы активно использовали метод главных компонент для подавления  $C$ -эффекта и низкочастотного сглаживания разрезов кажущегося сопротивления. Программа МРС, 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  $C$ -эффект и достаточно уверенно восстанавливается одномерный геоэлектрический разрез. Для этого необходимо на завершающей стадии обработки перед интерпретацией после МРС произвести объединение двух разрезов  $Amn$  и  $mnV$  в разрез  $AmnV$  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  $C$ , так и  $P$ -эффекты. Величины  $P$  и  $C$  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 $\rho_K$ 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 - модель палеодолины (D), в третьем слое - зона 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.

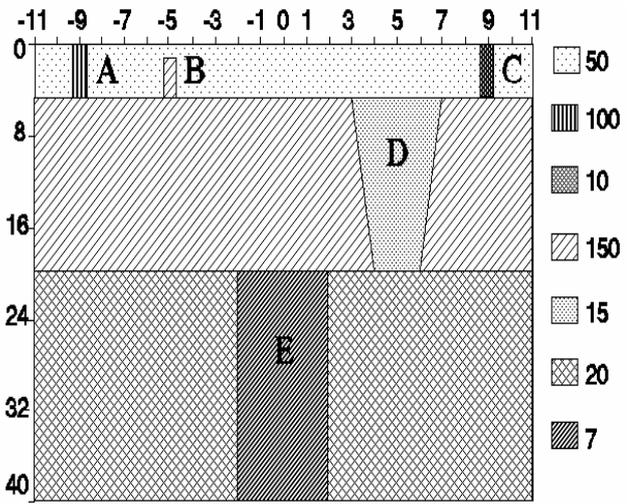


Рис.3.4.1. Модель 3-х слойного разреза с 5-ю неоднородностями.

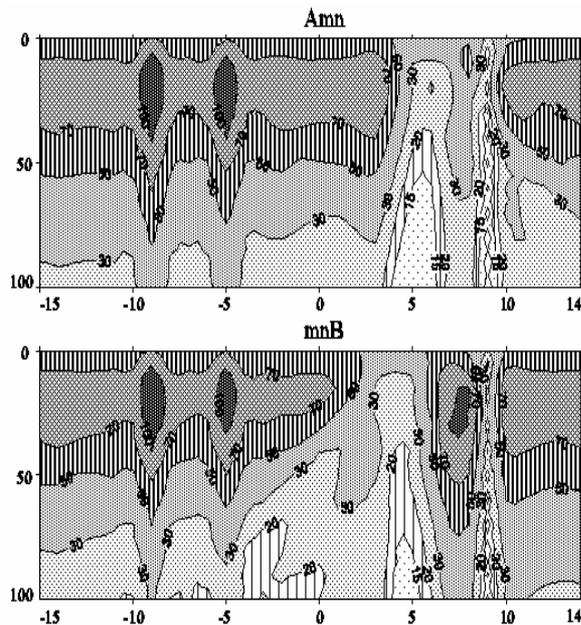


Рис.3.4.2. Разрезы  $\rho_K$  для AMN и MNB установок.

к эффекту "пробоя" этого слоя и перетекания тока через неоднородность D из первого слоя в третий.

На рис.3.4.2 показаны разрезы  $\rho_K$  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  $\rho_K$  сильнее заметен от погруженного во второй слой объекта D. Это можно объяснить особой позицией проводящей неоднородности во втором слое высокого сопротивления, приводящей

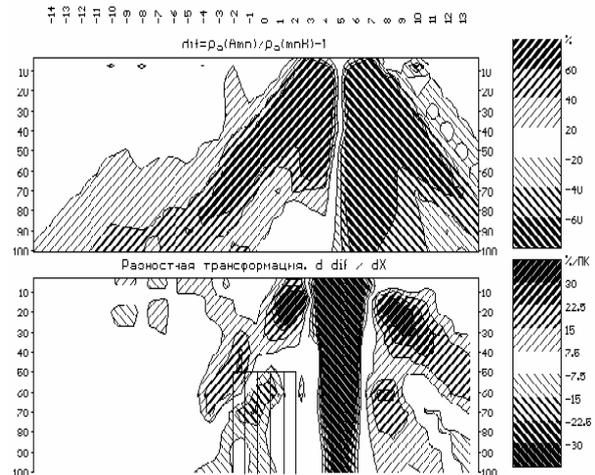


Рис.3.4.3. D- трансформация поля  $\rho_K$ .

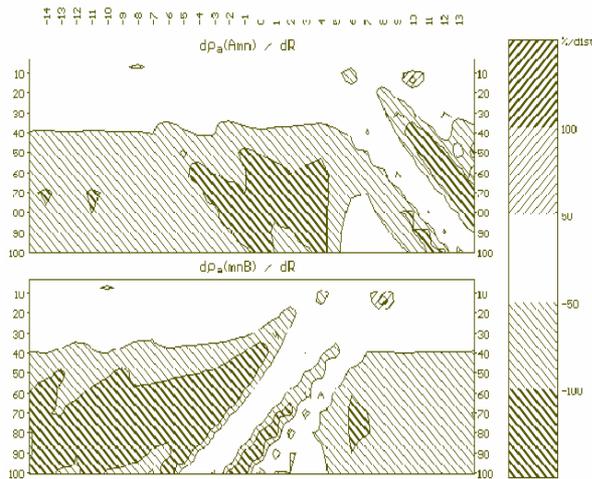


Рис.3.4.5. V- трансформация с точкой записи, отнесенной к середине MN.

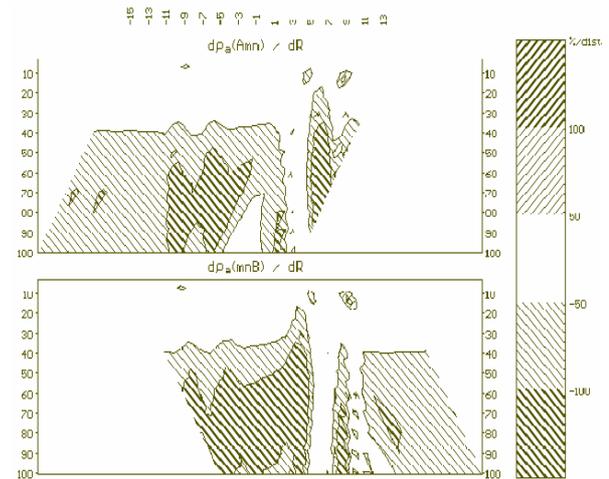


Рис.3.4.6. V- трансформация с точкой записи, отнесенной к электродам А и В.

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

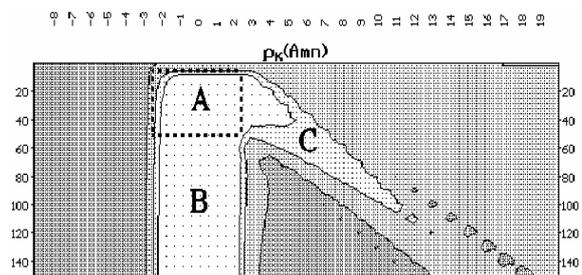


Рис.3.4.4. Поле  $\rho_k$  над моделью объекта в полупространстве.

точного понимания возникающих эффектов целесообразно рассмотреть эффект искажения поля  $\rho_k$  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 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).

Устранение искажений, вызванных приповерхностными неоднородностями,

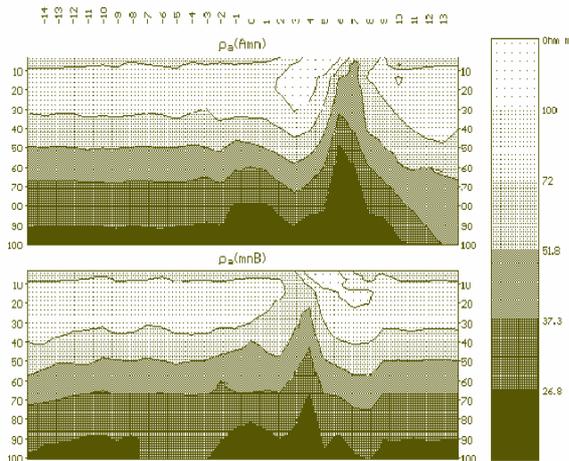


Рис.3.4.7. Поле  $\rho_k$  после медианной полировки.

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 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  $\rho_k$ , 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

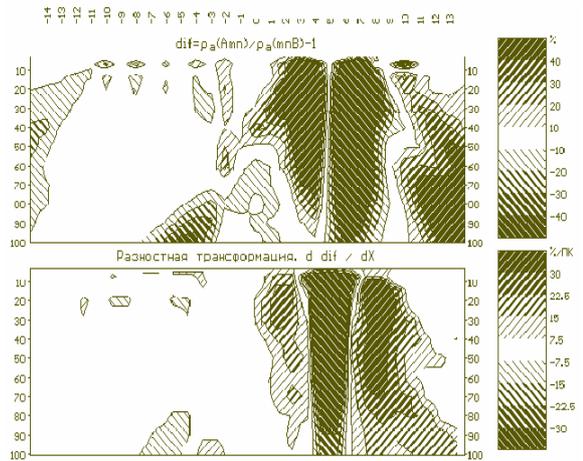


Рис.3.4.8. D- трансформация после медианной полировки.

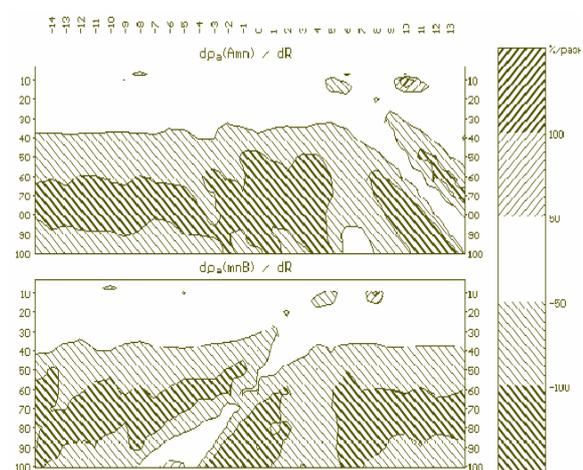


Рис.3.4.9. V- трансформация после медианной полировки.

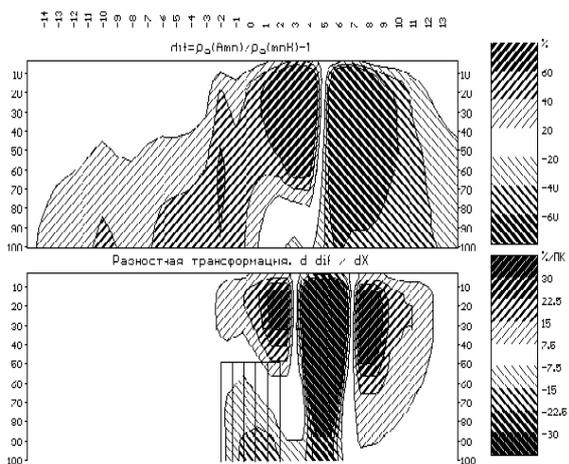


Рис.3.4.10. D- трансформация после Median и MPC.

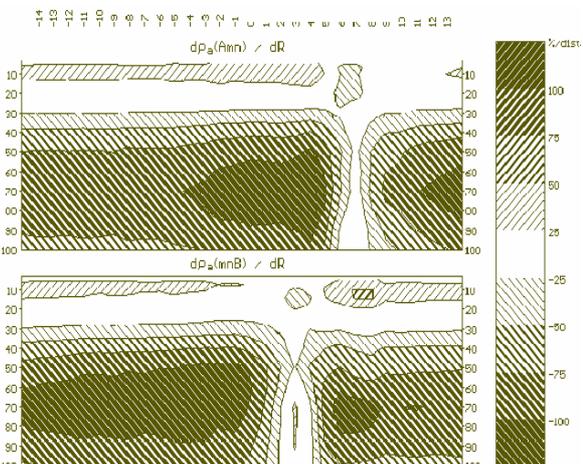


Рис.3.4.11. V- трансформация после Median и MPC.

приповерхностных, а не глубинных искажений.

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  $\rho_K$  -AB/2 (A-C) и графиков стандартного множителя  $\epsilon$ , характеризующего величину дисперсии кривых ВЭЗ в зависимости от разноса. Рис.3.4.12,А и D-1 соответствуют исходным данным моделирования поля  $\rho_K$  без обработки, рис.3.4.12,В и D-2 - данным после медианной полировки, а рис.3.4.12,С и D-3 - данным ВЭЗ после Median, MPC и объединения кривых  $\rho_K$  для AMN и MNB в  $\rho_K$  AMNB для симметричной четырехэлектродной установки. Максимумы дисперсии на рис.3.4.12,Д 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. Относительное 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

Продемонстрируем 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.

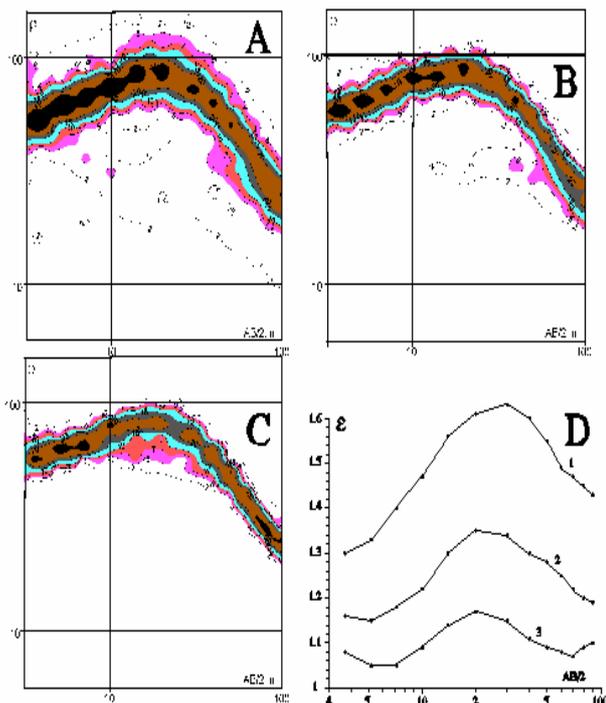


Рис.3.4.12. Статистический анализ ВЭЗ на разных стадиях обработки.

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 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).

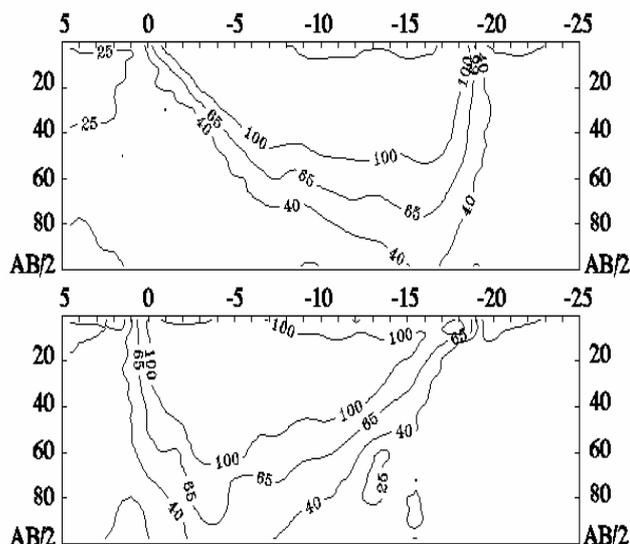


Рис.3.4.13. Разрезы  $\rho_k$  для AMN и MNB ВЭЗ.

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.

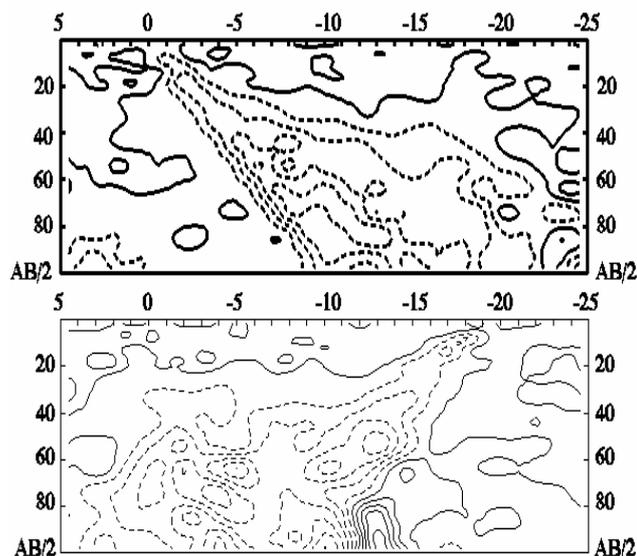
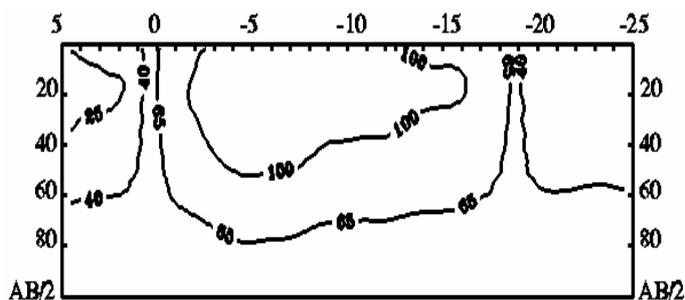


Рис.3.4.14. Разрезы вертикальных производных.

Наилучшие результаты удалось получить с помощью следующей методики обработки.

Данные трехэлектродных зондирований (AMN и MNB отдельно) обработали с помощью программы компонентного анализа (МРС) для подавления высокочастотных помех и уменьшения влияния искажений. После

этой процедуры на разрезах  $\rho_k$  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  $\rho_k$  (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

Рис.3.4.15. Разрез  $\rho_k$  после МРС и суммирования AMN и MNB.

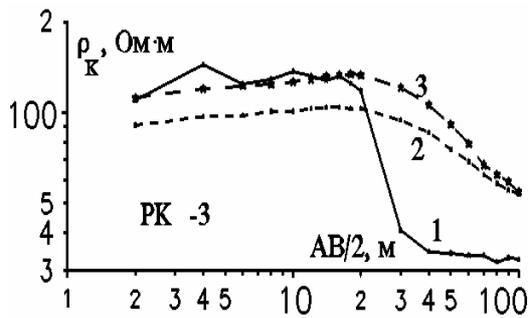


Рис.3.4.16. Кривые ВЭЗ для пикета -3.

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

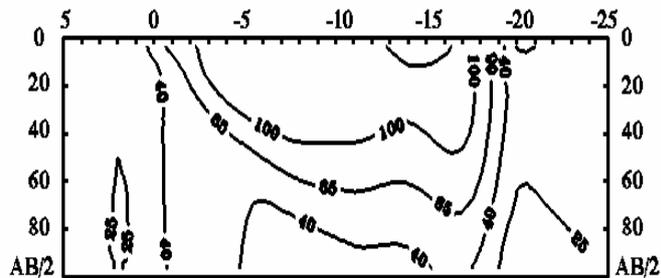


Рис.3.4.18. Разрез  $\rho_k$ , рассчитанный по IE2DL для модели с рис. 3.4.17, B.

равна 13,7%, а для кривых 2 и 3 - 1,8 и 1,4%.

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

### Выводы к главе 3

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

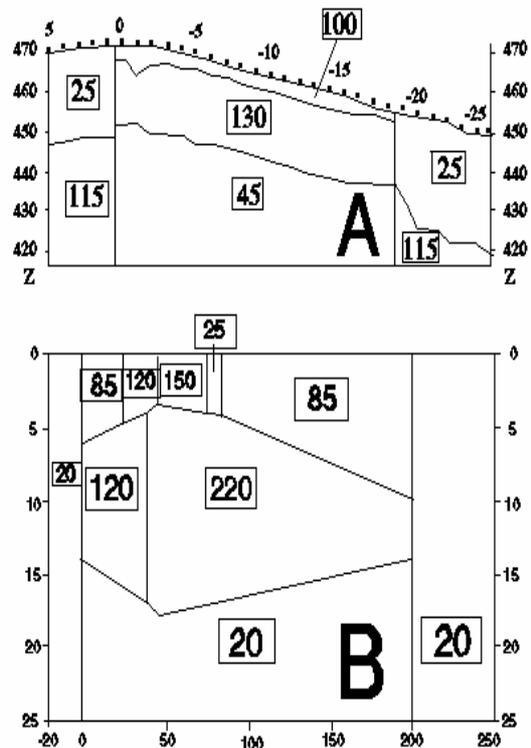


Рис.3.4.17. Геоэлектрические 1D и 2D модели г. Придорожной.

ВЭЗ. Косвенной оценкой работы алгоритма компонентного анализа может служить ошибка совмещения интерпретируемых кривых ВЭЗ с теоретическими. Для кривой 1 она

5. Новая методика полевых работ наиболее эффективно может быть реализована с помощью многоканальных полевых аппаратных 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).

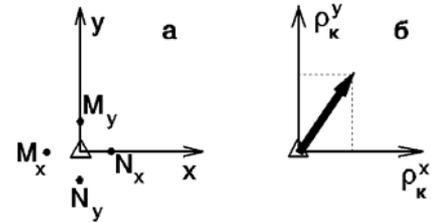


Рис. 4.1.1. Векторное представление кажущегося сопротивления.

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 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 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 (EZ). 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 EX, может быть довольно причудливой. Объяснение такой картины заключается в том, что обычно при расчете  $\rho_k$  нормировку наблюденного поля ведут относительно той компоненты плотности тока, вдоль которой измеряют электрическое поле. В неоднородных средах аномальная часть поля  $E_{АН,Х}$  может быть во много раз больше первичного поля  $E_{О,Х}$  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]:

$$E_n^\Sigma(M) = E_n^0(M) + \int_S I_s(P) \frac{\partial G(P, M)}{\partial n_M} dS, \quad (1)$$

где

$$I_s(M) = 2 \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \cdot E_n^{e'}(M). \quad (2)$$

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,  $I_s$  - плотность источника в точке  $M$ , 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.

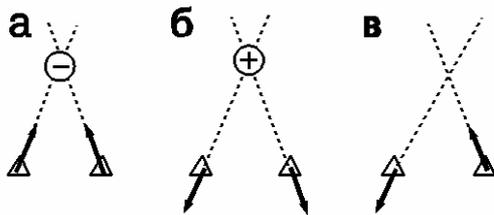


Рис.4.1.2. Схождение и расхождение аномального электрического поля. Векторы сходятся к отрицательным источникам и расходятся от положительных.

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 векторов, то часть из них будет направлена к одному источнику, а другая - к источнику противоположного знака. На рис.4.1.3 схематически показана структура векторов  $\rho_k$  вблизи вытянутой высокоомной неоднородности, которая как бы подсвечивается питающим электродом А.

Аномальные вектора располагаются строго в соответствии со структурой

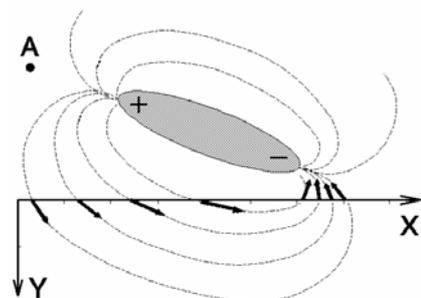


Рис.4.1.3. Поведение аномальных векторов  $\rho_k$  вблизи неоднородности.

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.

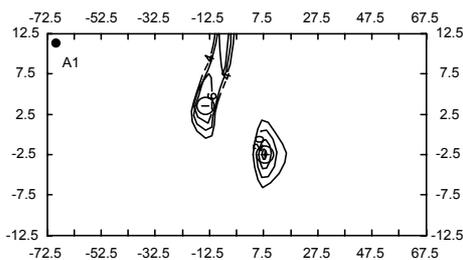
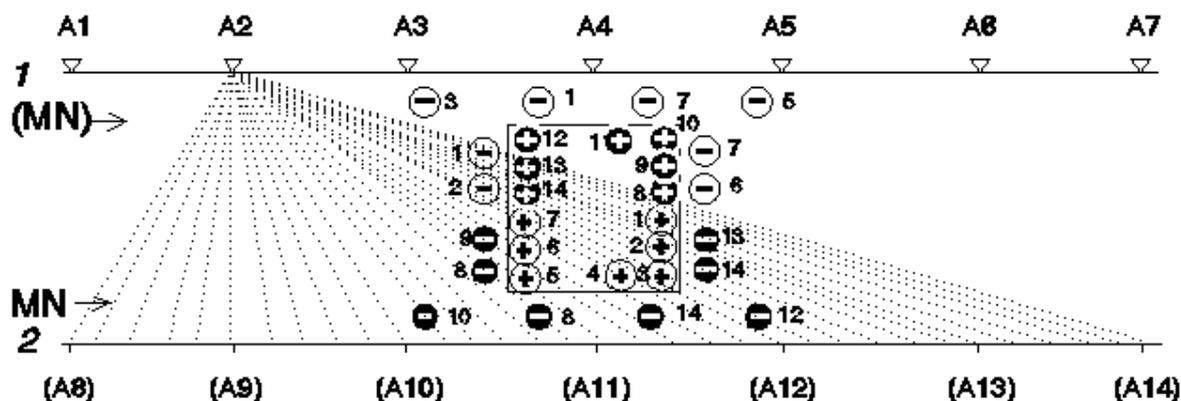


Рис.4.1.4. Псевдотомограмма распределения вторичных токовых источников.

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



Условные обозначения:

Вторичные источники

при положении питающего электрода

на профиле 1:

на профиле 2:

⊖ - отрицательный

⊖ - отрицательный

⊕ - положительный

⊕ - положительный

⊖5 - вторичный источник

для питающего электрода A5

Рис.4.1.5. Моделирование векторной съемки при межшахтном просвечивании.

питающих электродов меняется. На рис.4.1.4 показано "распределение" вторичных токовых источников, когда питающий электрод находится в точке A1. 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.

Идея векторных измерений электрического поля не нова. Например, В.А.Комаров, Л.М.Июффе 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  $y$ .

##### Поле источника тока в однородном полупространстве.

Рассмотрим следующую модель (рис.4.2.1). В однородном полупространстве с удельным сопротивлением 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

- $A'(X_a, Y_a, -Z_a)$   
Мнимый источник

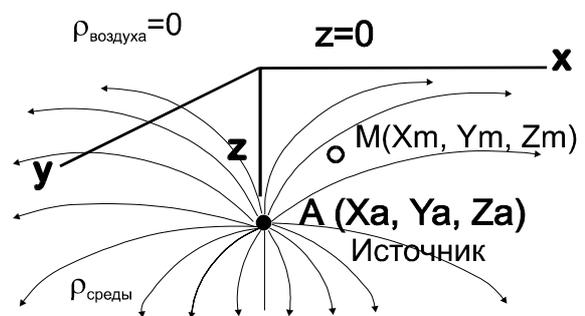


Рис.4.2.1. Источник тока в однородном полупространстве.

образом:

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}, \quad (3)$$

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:

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

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:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{U}(m, z) e^{-i(k_x X + k_y Y)} dk_x dk_y = \int_0^{\infty} \hat{U}(m, z) m J_0(mr) dm.$$

Введем обозначение

$$\bar{U} = \hat{U} m. \quad (4)$$

Тогда

$$U(r, z) = \int_0^{\infty} \bar{U}(m, z) J_0(mr) dm$$

$$u \quad \bar{U}(m, z) = A e^{mz} + B e^{-mz}$$

является общим решением уравнения Гельмгольца.

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

$$\frac{I\rho}{4\pi\sqrt{r^2 + (z - z_A)^2}} = \frac{I\rho}{4\pi} \int_0^{\infty} e^{-m|z-z_A|} J_0(mr) dm.$$

Тогда в слое с источником спектральный потенциал описывается формулой:

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

Кроме того, спектральный потенциал должен удовлетворять следующим физическим условиям:

$$\bar{U}_i = \bar{U}_{i+1}, \quad \frac{1}{\rho_i} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho_{i+1}} \frac{\partial \bar{U}_{i+1}}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\left. \frac{\partial \bar{U}_1}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \bar{U}_N \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0,$$

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

**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 источником постоянного тока. Пусть разрез состоит из  $N$  слоев, каждый из которых характеризуется удельным электрическим сопротивлением  $\rho_i$  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. 4.2.2).

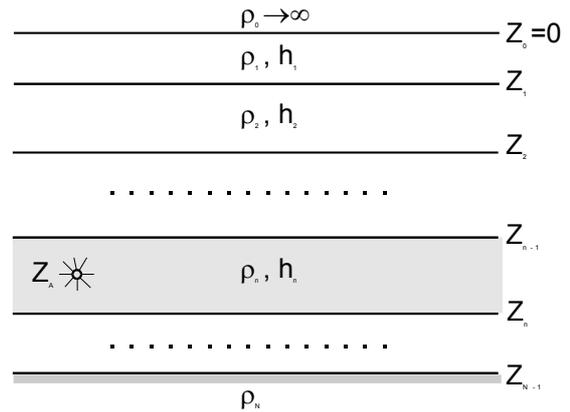


Рис.4.2.2. Модель слоистой среды с точечным источником тока.

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.

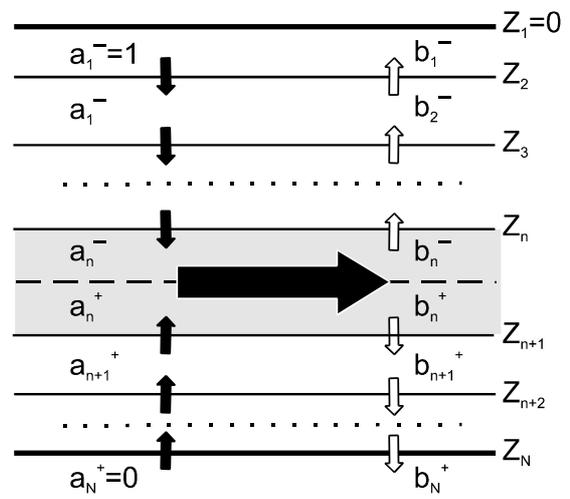


Рис.4.2.3. Схема метода прогонки.

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 позволяет унифицировать представление спектрального потенциала во всех слоях.

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

$$\tilde{U}_i(z) = b_i^- [a_i^- e^{-m(z-z_i)} + e^{m(z-z_i)}]; \quad \text{при } i = 1, \dots, n; z < z_A.$$

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

$$\tilde{U}_i(z) = b_i^+ [e^{-m(z-z_{i+1})} + a_i^+ e^{m(z-z_{i+1})}]; \quad \text{при } i = n, \dots, N; z > z_A.$$

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:

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

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  $z_i < z_a$  (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  $z_{i+1} > z_a$ :

$$\begin{aligned} b_i^+ [1 + a_i^+] &= b_{i+1}^+ [e^{mh_{i+1}} + a_{i+1}^+ e^{-mh_{i+1}}], \\ -\frac{mb_i^+}{\rho_i} [1 - a_i^+] &= -\frac{b_{i+1}^+ m}{\rho_{i+1}} [e^{mh_{i+1}} - a_{i+1}^+ e^{-mh_{i+1}}]. \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

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  $z=z_A$ :

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

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:

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

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  $b_i$ :

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

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

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

Выразим  $b_i$  через  $b_n$ :

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

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  $m$ :

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

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

Найдем выражение для производной спектрального потенциала по  $z$ :

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

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

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.

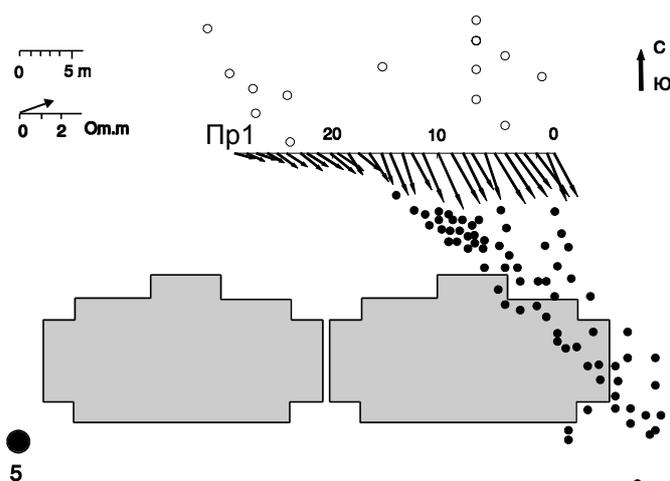


Рис.4.3.1. Пример векторных построений.

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 под земных 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 тампонировании цементным раствором, в котором значительно преобладала вода.

### **Геологическая ситуация**

На площади работ наблюдается моноклиальное 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 аргиллито - алевролитовая толща мощностью 5 - 10 м. На глубине 8 - 15 м залегает 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 расстояние 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:

$$\vec{\rho}_k = E / \|J_0\|.$$

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  $\rho$ , которое обеспечивало минимальную невязку между экспериментальными и теоретическими значениями модуля кажущегося сопротивления:

$$\vec{\rho}_k^{ан} = \operatorname{argmin} \|\vec{\rho}_k^{набл} - \vec{\rho}_k^{теор}\|,$$

где

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

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

Таким образом рассчитывались anomальные компоненты кажущегося сопротивления:

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

В дальнейшем в каждой точке наблюдения строился вектор anomального сопротивления. Так как влияние первичных питающих электродов в anomальном поле отсутствует, то источником anomального 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 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

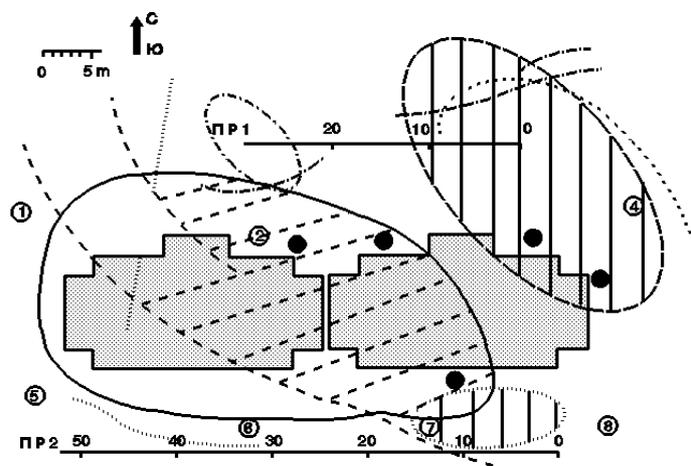


Рис.4.3.2. Результаты векторной съемки, проведенной в 1993 г.

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

- Условные обозначения:
- сильно обводненные зоны с предполагаемыми пустотами
  - зоны со средней обводненностью
  - осушенные зоны
- границы аномальных зон при положении источника в:
- скважине 1
  - скважине 2
  - скважине 4
  - скважина N 1
  - скважине 5
  - скважине 6
  - скважине 7
  - скважине 8
  - скважины, предлагаемые для бурения и тампонажных работ

Условные обозначения к рис.4.3.2

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

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

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

## 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 [Negi and Saraf, 1990].

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  $\rho_k$  вдоль слоистости. Этот известный факт получил название парадокса анизотропии [Бурсиан, 1972; Заборовский, 1963]. 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 двух УЭС. Однако, рассчитывая УЭС системы чередования слоев нужно помнить, что для расчета средних продольных и поперечных сопротивлений используются не  $\rho$  слоев непосредственно, а связанные с ними  $S$  и  $T$  слоев.

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

$$\text{откуда } \rho_{\parallel} \text{ или } \rho_L = h_{\Sigma} / S_{\Sigma},$$

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

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

Полагая, что  $h_1=h_2$ , получим

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

Задав, например  $\rho_1 = 1$  Ом.м, а  $\rho_2 = 10$  Ом.м, получим  $\rho_L = 1.9$  Ом.м и  $\rho_N = 5.5$  Ом.м, что отличается от интуитивно ожидаемых значений  $\rho_N$  и  $\rho_L$ . Коэффициент анизотропии такой модели  $\lambda=1.7$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_L}} = \sqrt{\frac{5.5}{1.9}} \approx 1.7,$$

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 об электрическом поле над однородной анизотропной средой была рассмотрена В.Р.Бурсианом [1972], 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 угла 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 [1951] 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 [1963], выражения для поля и потенциала используются большинством исследователей в настоящее время.

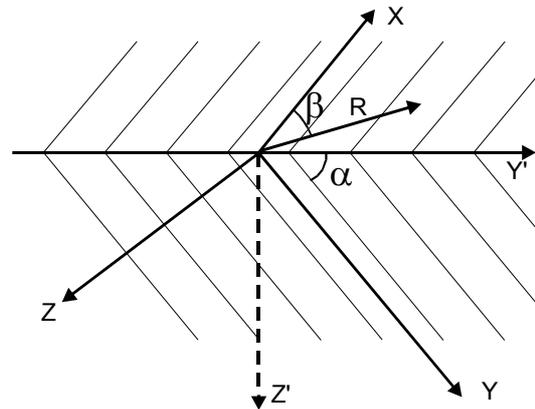


Рис.5.1.1. Система координат над анизотропной средой.

В своих работах А.С.Семенов [62-65] отметил, что необходимо отдавать предпочтение установке потенциала, 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.Сыскова [1976] посвящена решению задачи о поле точечного источника тока в присутствии 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.

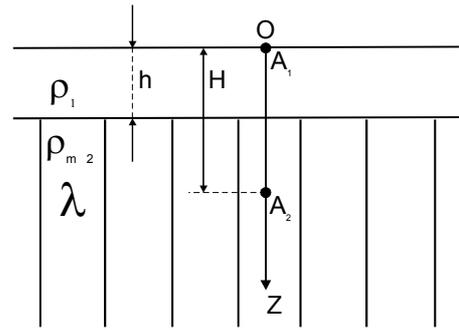


Рис.5.1.2. Модель среды в работе Бреднева и Сыскова (1976).

Ю.М.Гуревич и О.В.Сажина [1977] 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 [Шевнин, Ракутхани, 1992] для круговых наблюдений предложена установка, получившая название триполь (Т - установка). Это сочетание установки Амн 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.

### 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 [Бурсиан, 1972; Заборовский, 1963]. Рассмотрим основные положения этой задачи. Обозначим истинное УЭС по простиранию анизотропной толщи через  $\rho_T$ , а вкрест простирания через  $\rho_N$ . Квадратный корень из отношения  $\rho_N$  к  $\rho_T$  - это коэффициент анизотропии  $\lambda$ , а корень из их произведения - среднее квадратичное сопротивление  $\rho_M$ . 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 - вкрест простирания анизотропной среды. Угол падения анизотропной толщи -  $\alpha$ , а угол между линией простирания и линией разноса R от электрода А к точке измерения М -  $\beta$ .

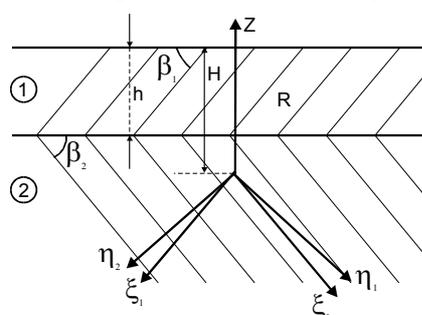


Рис.5.1.2. Модель среды для задачи Гуревича и Сажиной(1977).

Потенциал точечного источника на поверхности анизотропной среды определяется следующей формулой [Заборовский, 1963]:

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

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

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

где  $r$  равно проекции АМ на плоскость ХОУ,  $Z$  - глубина источника тока,  $\beta$  - угол между линией простираения 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 вкрест напластования, можно обнаружить, что значения  $U$  или  $\rho_K$  окажутся различными.

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

Значение радиальной составляющей вектора плотности тока  $j_R$  на поверхности земли может быть определено по формуле:

$$j_R = \frac{I\rho_T\sqrt{\rho_N} \cdot \sqrt{x^2 + y^2}}{2\pi[\rho_T x^2 + \rho_N y^2]^{3/2}} \quad (3)$$

На равных удалениях от источника по осям Х и У значения плотности тока составляют:

$$\begin{aligned} \text{при } x=1, y=0: j_x &= \frac{I\lambda}{2\pi} \\ \text{при } x=1, y=0: j_y &= \frac{I}{2\pi\lambda^2} \end{aligned}$$

а их отношение будет равно  $\lambda^3$ , что говорит о преимущественном растекании тока в направлении простираения анизотропной толщи.

Формула для расчета кажущегося сопротивления с установкой АМN 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  $\rho_{MN}$  и  $j_{MN}$  - УЭС и плотность тока вблизи приемных электродов в реальной среде. При ориентации установки по простираению:

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

а вкрест простираения:

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

Изменения плотности тока для разных азимутов наблюдений над анизотропным полупространством оказываются сильнее, чем изменения УЭС, поэтому  $\rho_K$  и оказываются ориентированными иначе, чем истинные  $\rho$ . Таким образом возникновение парадокса анизотропии можно объяснить за счет преимущественного роста плотности тока по простираению анизотропной толщи.

**Замечание.** Если бы каким либо образом удалось в приведенных выше формулах поменять местами сочетания  $\rho_{MN}$  и составляющих плотности тока  $j_{MN}$ , то отношение осей эллипса анизотропии увеличилось бы до  $\lambda^5$ . 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 -  $\lambda_K$ .

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 AB\_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  $\lambda^5$ , вместо  $\lambda$  для линейных установок.

Формула для расчета  $\rho_K$  в случае идеальной установки ДЭП:

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

$$\text{где } A_1 = \sin^2 \beta + B \cos^2 \beta, \quad B_1 = \cos^2 \beta + B \sin^2 \beta, \\ C_1 = (B - 1) \sin \beta \cos \beta, \quad B = \cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha.$$

(Здесь угол  $\beta$  - между направлением простирания и разносом R, соединяющем центры диполей AB и MN). Из формулы 5 можно оценить  $\lambda_K$ . При  $\alpha=90^\circ$ ,  $\rho_K$  по простиранию ( $\beta=0^\circ$ ) равно:  $\rho_K = \rho_M \lambda^2$ , а вкrest 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) видно основное преимущество установки ДЭП - заметно более высокая чувствительность к

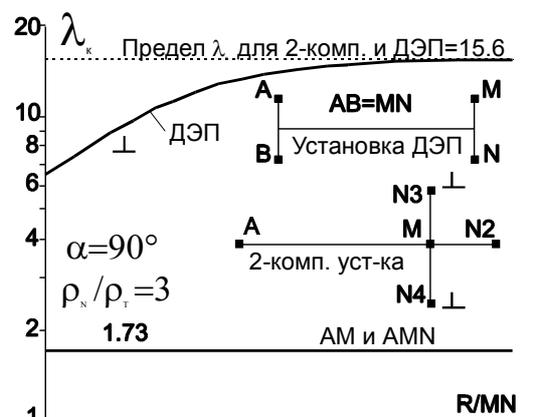


Рис.5.1.4. Зависимости  $\lambda_K$  для AMN, ДЭП и T-установки от R/MN.

анизотропии. Там же показано влияние реальных значений  $R/AB$  (при  $MN=AB$ ) на  $\lambda_k$  установки ДЭП. Установка ДЭП близка к идеальной при  $R/AB > 5$ , когда  $\lambda_k$  близко к  $\lambda^5$ . Для квадратной установки ( $R/AB=1$ )  $\lambda_k$  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.5.1.4-5.1.5). Один питающий электрод А располагается на поверхности или в скважине. Измерительная система находится

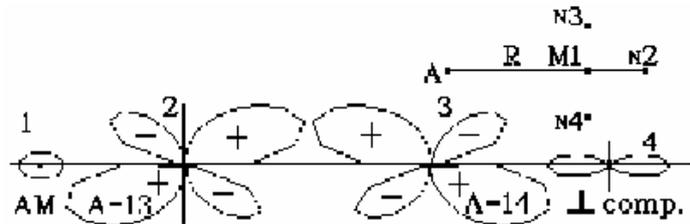


Рис.5.1.5. Эллипсы для разных составляющих Т-установки.

на расстоянии  $R$  от  $A$  и состоит из трех линий  $MN$ , сходящихся в одной точке  $M$  и ориентированных по радиусу, проведенному из точки  $A$ , и в разные стороны перпендикулярно ему. Это сочетание установки  $AMN$  и двух Г-образных установок. В отличие от известной установки метода двух составляющих [Боголюбов и др., 1984], для Г-образной установки можно вычислить  $\rho_k$ . Сочетание двух Г-образных установок позволяет вычислить среднее значение  $\rho_k$ , 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 простирания (рис.5.1.5 (2,3)), но среднее  $\rho_k$  Т-установки (рис.5.1.5(4)) не смещено. 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  $\rho_k$  Т - установки эквивалентно по чувствительности к анизотропии  $\rho_k$  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:

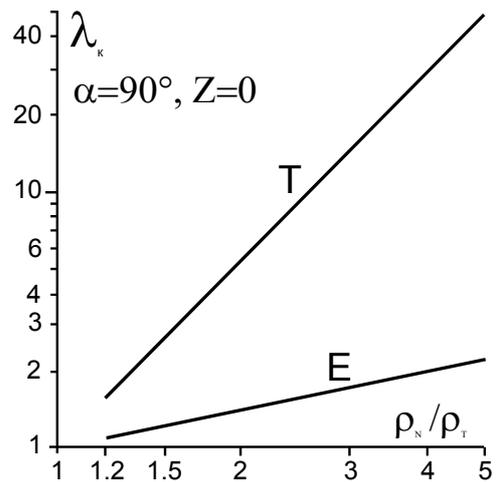


Рис.5.1.6. Зависимость  $\lambda_k$  от  $\rho_n/\rho_t$ .

установок:  $K_{дэп} = 2\pi \frac{R^3}{AB \cdot MN}$ ,  $K_T = 4\pi \frac{R^3}{MN^2}$ ,  
а для реальной Т -установки:

$$K_T = \frac{2\pi}{1/AM - 1/AN}$$

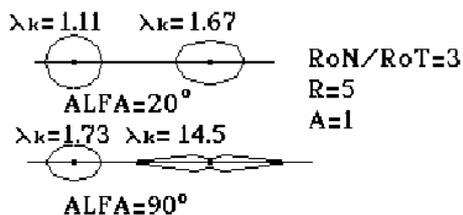


Рис.5.1.7. Эллипсы анизотропии для E и T компонент при  $\alpha=90$  и  $20^\circ$ .

Как и установка ДЭП, T-установка дает  $\lambda_k$  пропорциональное  $\lambda^5$  (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, T-установка еще сохраняет заметную эллиптичность круговой диаграммы (рис. 5.1.7). Отношения осей эллипса анизотропии (или  $\lambda_k$ ) традиционных (AMN) и T- установки зависят от многих условий наблюдений и среды: отношения R/MN (рис.5.1.4), истинного  $\lambda$  (рис.5.1.6), угла наклона анизотропной толщи (рис.5.1.8).

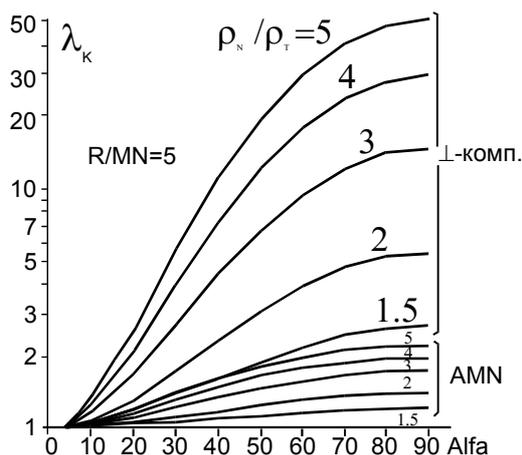


Рис.5.1.8. Зависимости  $\lambda_k$  от  $\alpha$  и  $\lambda$  для E и T составляющих при Z=0.

### Круговые наблюдения с погруженным источником

Преимущества T-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 AM (для краткости - U), AMN (для краткости - E) и 2-компонентной (T). Эта асимметрия может быть выражена в виде отношения b/c, где b - значение  $\rho_k$  по восстанию, а c - по падению толщи. В силу асимметрии эллипсов меняется величина  $\lambda_k$  - отношение ширины эллипса по простиранию (2a) к ширине вкрест 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  $\lambda_k$ , 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

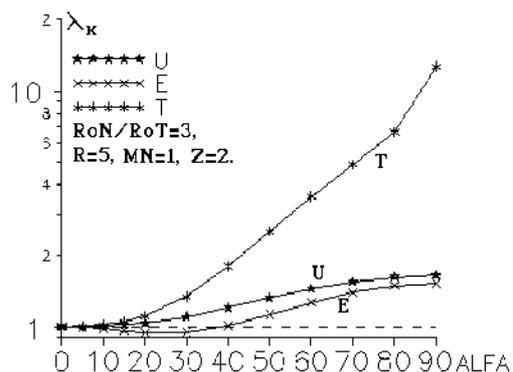


Рис.5.1.9. Зависимость  $\lambda_k$  для U, E и T от угла  $\alpha$ .

разному, тогда как при заземлении A на поверхности они проявляли себя одинаково. Если  $\lambda_k$  для E и U с ростом  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  возрастает монотонно, то для E на рис.5.1.9 видна область инверсии (при  $\alpha$  от  $10^\circ$  до  $40^\circ$ ).

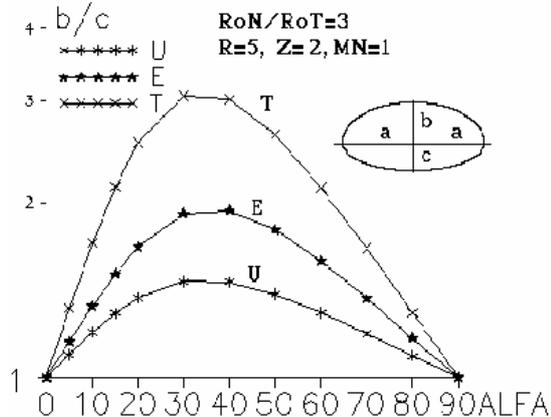


Рис.5.1.10. Зависимость b/c от угла  $\alpha$  для U, E и T компонент.

Графики отношения  $b/c$ , в отличие от  $\lambda_K$  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  $\lambda_K$  от  $Z/R$ . При  $Z/R$  от 0.02 до 0.5  $\lambda_K$  сначала меняется слабо, а потом более заметно. T - компонента по величине  $\lambda_K$  заметно выше U и E. Величины  $\lambda_K$  для U и E при  $Z/R < 0.1$  практически не различаются. С ростом  $Z/R$   $\lambda_K$  для U убывает монотонно, а  $\lambda_K$  для E испытывает инверсию, особенно сильную при  $Z/R = 1$ . При инверсии ось эллипса по простиранию оказывается короче оси эллипса вкрест простирания (нет парадокса анизотропии), что проявляется при  $Z/R$  от 0.6 до 2.5. При больших  $Z/R$  парадокс анизотропии восстанавливается и  $\lambda_K$  возрастает до 1.6. Для T - компоненты  $\lambda_K$  после резкого убывания становится меньше 1, т.е. также отмечается инверсия, хотя и менее выраженная, чем для E, затем с ростом  $Z/R$   $\lambda_K$  асимптотически приближается к 1 снизу.

На рис.5.1.12 показаны изменения в соотношении полуосей эллипса  $b$  и  $c$  (для азимутов  $90^\circ$  и  $270^\circ$ , по восстанию и падению толщи) в зависимости от  $Z/R$ . Эта асимметрия эллипса характеризует чувствительность компонент поля к углу наклона для 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 убывать, и становится не только меньше 1, но и 0. Это соответствует эллипсу для которого значения  $\rho_K$  в части азимутов положительны, а в другой части отрицательны (рис.5.1.13,C). 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,D. Фактически это означает, что эллипс  $\rho_K$ , построенный вокруг центра вращения не только асимметричен, относительно этого центра, но и не включает его в свой контур (рис.5.1.13,C). 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  $\lambda_K$  (отношение осей эллипса по простиранию и падению) и  $b/c$  (отношение  $\rho_K$  для азимутов  $90^\circ$  и  $270^\circ$  - по восстанию и падению анизотропной толщи). Эти значения определяются по результатам круговых наблюдений. Выходными параметрами, определяемыми по номограмме являются

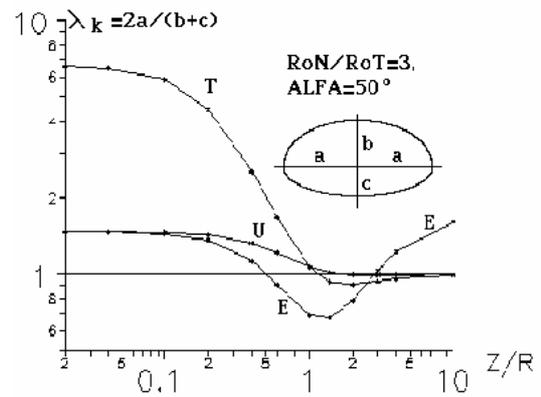


Рис.5.1.11. Зависимость  $\lambda_K$  от глубины  $Z/R$  источника тока.

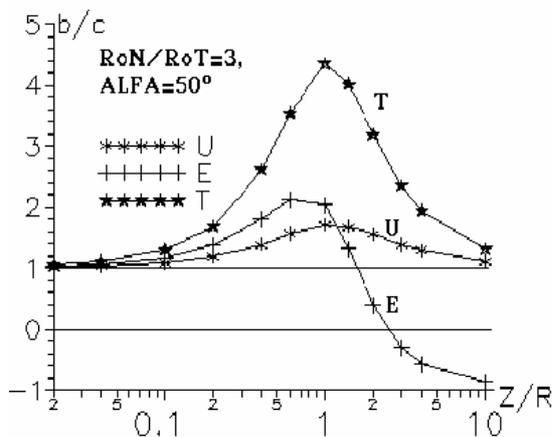


Рис.5.1.12. Зависимость  $b/c$  от глубины  $Z/R$  источника тока.

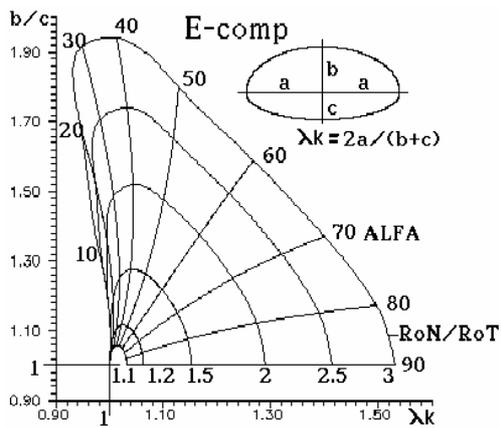


Рис.5.1.14. Номограмма для оценки анизотропии по E-компоненте.

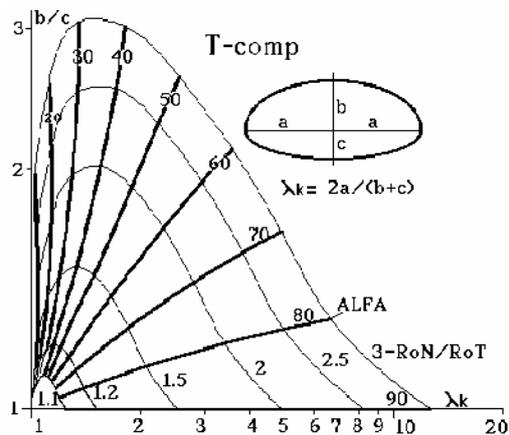


Рис.5.1.15. Номограмма для оценки анизотропии по T-компоненте.

использования и наглядности. Пользование аналитическими расчетными 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  $\rho_k$  для азимутов  $90^\circ$  (по восстанию (справа от 0)) и  $270^\circ$  (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  $\rho_k$  по восстанию толщи, сменяющиеся на положительные при дальнейшем удалении от A. Смена знака  $\rho_k$  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 значит  $\rho_k$  установки AMN - отрицательны. Точное положение точки  $X_0$  для идеальной AMN(E) определяется формулой [27]:

$$XO = Z \cdot \frac{C}{B}, \quad \text{где } C = \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot (\lambda^2 - 1), \quad B = \cos^2 \alpha + \lambda^2 \cdot \sin^2 \alpha.$$

Для оценки угла падения  $\alpha$ , эту формулу полезно номографировать.

угол падения  $\alpha$  и истинный коэффициент анизотропии, точнее  $\lambda^2 = \rho_N/\rho_T$ . 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  $\lambda_k$  и  $b/c$  для T заметно выше ( $\lambda_k$  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  $90^\circ$  до  $30^\circ$  и резко снижается для углов меньше  $30^\circ$ . Разрешающая способность растет с ростом отношения  $\rho_N/\rho_T$ . Номографическая форма оценки параметров нам кажется в данном случае предпочтительной в силу простоты

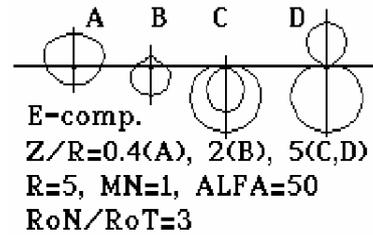


Рис.5.1.13. Эллипсы для E-компоненты при разных  $Z/R$ .

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 ( $\alpha, \lambda$ ) требуются наблюдения с погруженным питающим электродом. Здесь желательно измерение Е и Т 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  $\alpha$  можно получить, измеряя Е- компоненту по линии восстания и определяя точку  $X_0$  смены знака  $\rho_k$  (рис.5.1.16).

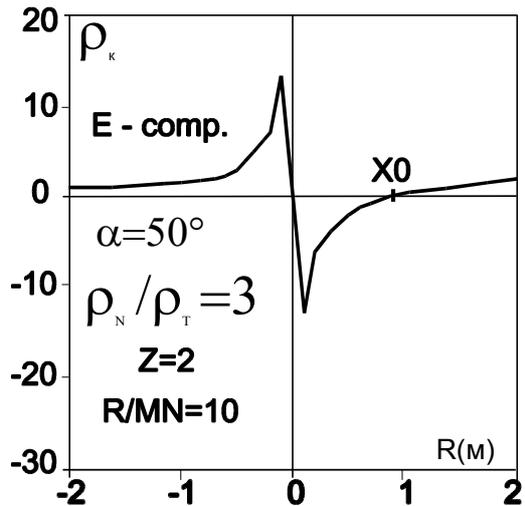


Рис.5.1.16. Изменения  $\rho_k$  для Е-компоненты по линии вкрест простирания.

## 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  $\rho_1$  и мощность  $H$ , анизотропное полупространство: продольное сопротивление  $\rho_T$  и поперечное  $\rho_N$ , коэффициент анизотропии  $\lambda = \sqrt{\rho_N / \rho_T}$ , среднее квадратичное сопротивление

$\rho_M = \sqrt{\rho_N \cdot \rho_T}$  и угол падения анизотропной толщи  $90^\circ$ . Ось X направлена вкост простираания анизотропной толщи, а ось Y - по простираанию, 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  $\rho_1$  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  $\alpha^2 = \rho_t / \rho_n = 1 / \lambda^2$ .

Граничные условия имеют следующий вид:

$$U_1 = U_2, \text{ при } z = H; \quad (10)$$

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

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

Физические условия на источнике и бесконечности можно записать следующим образом:

$$\begin{array}{lll} \lim_{x \rightarrow 0} U_1 = \infty; & \lim_{x \rightarrow \infty} U_1 = 0; & \lim_{x \rightarrow \infty} U_2 = 0. \\ & & y \rightarrow \infty \\ & & z \rightarrow \infty \end{array} \quad (14)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U \cdot \cos(k_x, x) \cdot \cos(k_y, y) dx, dy, \\ U &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{U} \cdot \cos(k_x, x) \cdot \cos(k_y, y) dk_x, dk_y. \end{aligned}$$

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

$$\bar{U}_1(k_x, k_y) = A_1(k_x, k_y) e^{z k_1} + B_1(k_x, k_y) e^{-z k_1} + \bar{U}_1^0, \quad (15)$$

где  $k_1 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ;

$$U_2(k_x, k_y) = B_2(k_x, k_y) e^{-z k_2}, \quad \text{где } k_2 = \sqrt{(\alpha k_x)^2 + k_y^2}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial U_1(k_x, k_y)}{\partial z} = k_1 A_1 e^{z k_1} - k_1 B_1 e^{-z k_1} - k_1 \frac{I \rho_1}{2\pi k_1} \cdot e^{-z k_1}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial U_2(k_x, k_y)}{\partial z} = -k_2 B_2 e^{-z k_2}. \quad (18)$$

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

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

и с его помощью выразим  $A_1$ :

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

Таким образом:

$$U_1(k_x, k_y) = \frac{I \rho_1}{2\pi k_1} A_1(e^{z k_1} + e^{-z k_1}) + U_0(k_x, k_y). \quad (20)$$

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

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

Перейдем к полярной системе координат, обозначив:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$U_1(r, \varphi, 0) = \frac{I \rho_1}{2\pi r} \cdot \left[ 1 + 2r \int_0^{\infty} \frac{K e^{-2k_r H}}{1 - K e^{-2k_r H}} \cdot \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(k_r, r \cdot \cos(k_\varphi - \varphi)) dk_\varphi \right) dk_r \right]. \quad (26)$$

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

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

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:

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

Воспользуемся тождеством:

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

тогда

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

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

Обозначим

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

Тогда

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

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

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

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

Интегралы берутся в явном виде,

$$\int_0^\infty (J_0(k_r r) dk_r = \frac{1}{r}, \quad \int_0^\infty J_{2n}(k_r \cdot r) dk_r = \frac{1}{r}, \\ \text{а } \frac{1}{2} B_0 + \sum_{n=1}^\infty B_{2n} \cdot \cos(2n\varphi) = A_1(\varphi).$$

Тогда

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

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:

$$U(r, \bar{\varphi}, 0) = \frac{I\rho_1}{2\pi r} \cdot \left[ 1 + \int_0^\infty J_0(k_r) B_0 \left( \frac{k_r}{r} \right) dk_r + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^\infty \left( \int_0^\infty J_{2n}(k_r) B_{2n} \left( \frac{k_r}{r} \right) dk_r \right) \cdot \cos(2n\bar{\varphi}) dk_\varphi \right]. \quad (33)$$

$$\rho_k(r, \bar{\varphi}, 0) = \rho_1 \cdot \left[ 1 + \int_0^\infty J_0(k_r) B_0 \left( \frac{k_r}{r} \right) dk_r + \right. \\ \left. + 2 \sum_{n=1}^\infty \left( \int_0^\infty J_{2n}(k_r) B_{2n} \left( \frac{k_r}{r} \right) dk_r \right) \cdot \cos(2n\bar{\varphi}) dk_\varphi \right]. \quad (34)$$

и основную расчетную формулу  $\rho_k$  для потенциал - установки:

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

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

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

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 С, что позволяет, после расчета С легко получить  $\rho_K$  для любого азимута установки. Важным вопросом является число членов ряда в формуле (35). Дополнительными исследованиями установлено, что гармоники  $S_n$  убывают быстро и с достаточной для практики точностью можно ограничиться пятью первыми гармониками ( $n=0\dots4$ ).

**Выражения для компонент поля.** Преобразуем формулу (32) для  $U$  в выражения для компонент поля  $E_R$  и  $E_\varphi$ :

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

$$\frac{I\rho_1}{2\pi r^2} \left[ 1 - r^2 \left[ \int_0^\infty k_r J'_0(k_r r) B_0(k_r) dk_r - \right. \right.$$

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

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

Отметим особенности формулы для  $E_\varphi$  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  $E_\varphi$  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 установки включают в себя по две элементарные Г-установки, поэтому даже при ориентации установок вдоль и поперек простирания приемные электроды отходят в сторону от оси установки и обеспечивают влияние  $E_\varphi$  компоненты. Соотношение форм этих компонент в зависимости от азимута установки видно на рис.5.2.1. Соотношение амплитуд  $E_r/E_\varphi$  меняется с разнесом. Например, для модели рис.5.2.3,А это отношение около 170 на разнесе 1 м и 1.5 на разнесе 100 м. На малых разнесах 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  $E_r/E_\varphi$  быстро уменьшается.

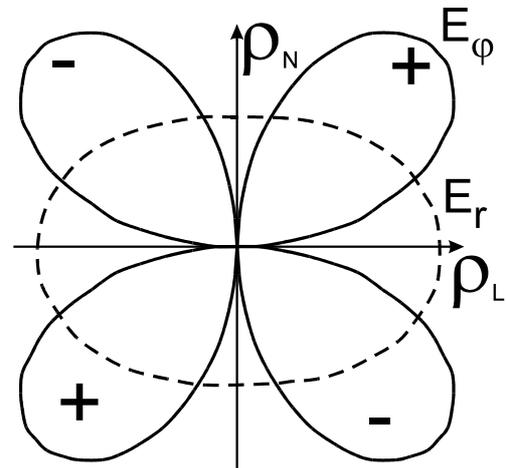


Рис.5.2.1. Радиальная и азимутальная компоненты поля.

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

На рис.5.2.2,А поведение кривых  $\lambda_K$  отличается тем, что для потенциал установки значение  $\lambda_K$  монотонно возрастает от 1 до  $\lambda_{ист}$ , а для градиент установки проходит через область слабого минимума, где  $\lambda_K < 1$  (в интервале разнесов 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 ( $\lambda_K$ ) над моделями разрезов, параметры которых указаны на рис.5.2.2, D. Рассмотрены три случая, когда сопротивления анизотропной среды  $\rho_T$  и  $\rho_M$  меньше  $\rho_1$  (А), больше  $\rho_1$  (В) и когда  $\rho_T < \rho_1 < \rho_M$  (С). В целом кривые  $\rho_K$  для потенциал (U) и градиент (E) установок ведут себя сходным образом, начинаясь от значения  $\rho_1$  слева и выходя к значениям  $\rho_M$  для поперечной и  $\rho_T$  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.

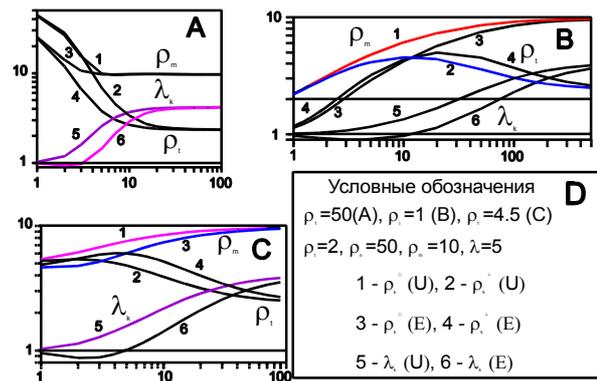


Рис.5.2.2. Кривые зондирования АМ и АМN над анизотропной средой с наносами

На рис.5.2.2,А поведение кривых  $\lambda_K$  отличается тем, что для потенциал установки значение  $\lambda_K$  монотонно возрастает от 1 до  $\lambda_{ист.}$ , 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	$\rho_K^{\perp}(U)$	$\rho_K^{\parallel}(U)$	$\lambda_K(U)$	$\rho_K^{\perp}(E)$	$\rho_K^{\parallel}(E)$	$\lambda_K(E)$
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  $\rho_K$  для продольных и поперечных установок обнаруживают более заметные различия. Продольные кривые выходят к значению  $\rho_M$  снизу, а поперечные - к значению  $\rho_T$  сверху, при этом первые являются двухслойными по форме, а вторые - трехслойными типа К. На графике  $\lambda_K$  для градиент - установки заметен широкий минимум в интервале разносов от 1 до 10 г/м, где парадокс анизотропии отсутствует.

Кривые  $\rho_K$  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  $\lambda_K$  для градиент - установки также имеет минимум с  $\lambda_K < 1$  в области малых г/м  $< 5$ .

#### Сравнение кривых ВЭЗ для анизотропной и изотропной моделей

На рис. 5.2.3 можно видеть поведение кривых  $\rho_K(U$  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);  $\rho_2=10$  Ом.м (Кр.3) или  $\rho_2=2$  Ом.м (Кр.4), а для анизотропного основания  $\rho_T=2$ ,  $\rho_N=50$ ,  $\rho_M=10$ ,  $\lambda=5$ . Для нисходящих кривых  $\rho_K(U$  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 Ом.м, чем изотропные, а поперечные анизотропные кривые (2) выходят к асимптоте 2 Ом.м позже, чем изотропные. Для модели с  $\rho_1=1$  Ом.м (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.

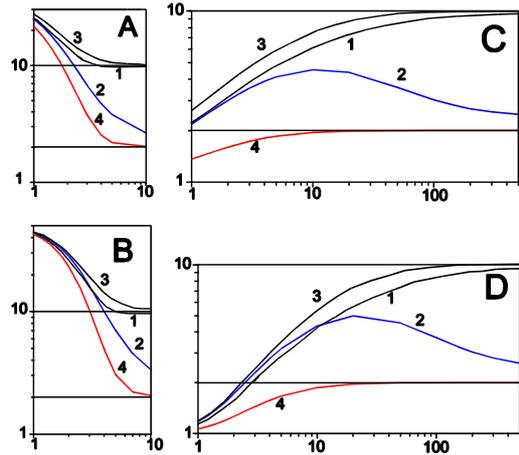


Рис.5.2.3. Сравнение анизотропных и изотропных кривых ВЭЗ.

### 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 Ом.м (С). Выбор трех моделей аналогичен описанному ранее для потенциал- и градиент-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  $\lambda^5$ , по сравнению с линейными установками (АМ, АМН). 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(А-С) соответствуют: 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 АМН. Для случаев В и С поперечные кривые зондирования (2) над двухслойной средой имеют вид трехслойных, особенно в случае В.  $\rho_1=50$ ,  $H=1$ ,  $\rho_T=2$ ,  $\rho_N=50$ ,  $\rho_M=10$ ,  $\lambda=5$ .

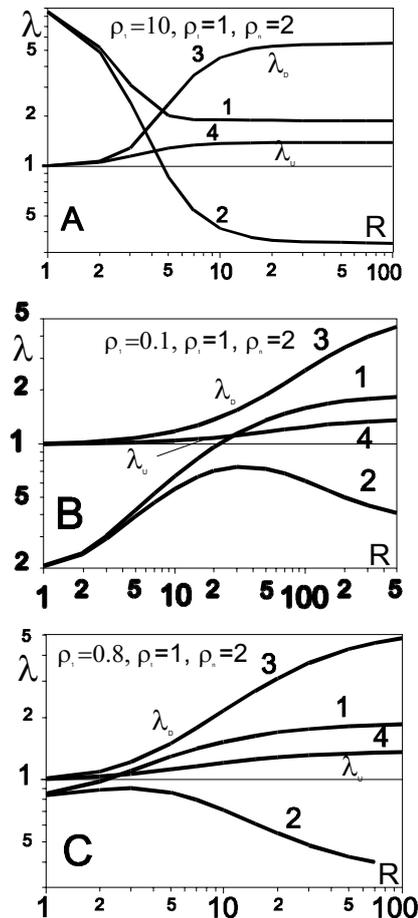


Рис.5.2.4. Результаты расчетов для установки ДЭЗ.

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.м.

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

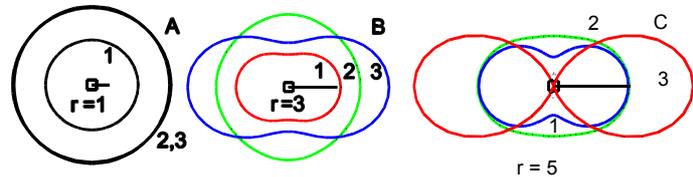


Рис.5.2.5. Диаграммы КЭП для модели А рис.5.2.2

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

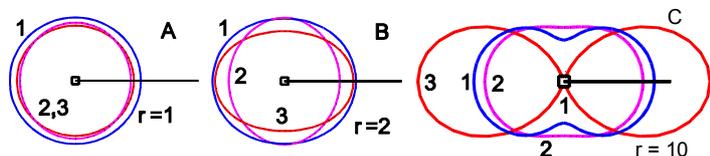


Рис.5.2.6. Диаграммы КЭП для модели С рис.5.2.2

На рис.5.2.6,В диаграмма для E вытянута вкост 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 E. Интересно отметить, что в этом случае  $\lambda_k$  для U установки выше, чем для E при близких или равных  $\rho_k^{\parallel}$  за счет заниженных  $\rho_k^{\perp}$  для U установки.

При дальнейшем росте разносов качественно картина не меняется, а происходят только некоторые количественные изменения. Диаграммы КЭП для U и E становятся почти идентичными, а диаграммы для D резко от них отличаются.

**Пример.** На рис.5.2.7 приведены результаты расчетов над моделью двухслойной среды с анизотропным основанием, соответствующей условиям Крымской учебной практики. Смоделирован разрез плато Патиль. Нижняя часть разреза сложена породами таврической серии, залегающими почти вертикально, с  $\rho_1=28$ ,  $\rho_n=74$ ,  $\rho_m=45$  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 (E) в практическом интервале разносов дает очень слабые различия продольных и поперечных кривых ВЭЗ (А). Это объясняет неудачи предпринимавшихся время от времени попыток обнаружить

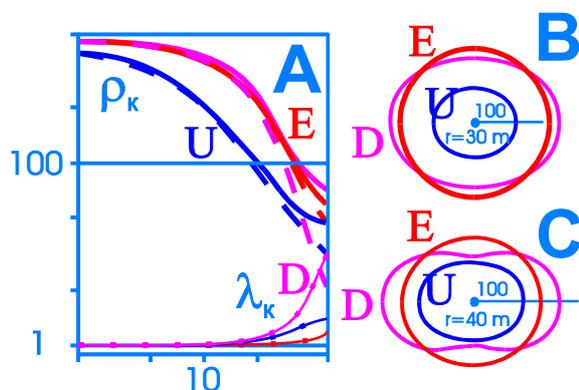


Рис.5.2.7. Расчеты ВЭЗ и КЭП для плато Патиль.

Этот 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.

**Выводы.** Анализ результатов зондирования для потенциал (АМ) -, градиент (АМН) - 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  $\rho_k$  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.

Определим систему координат, связанную со слоистостью анизотропной толщи (рис. 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 анизотропной толщи.

При переходе от вышеописанной системы координат ( $X, Y, Z$ ) к системе координат ( $X_1, Y_1, Z_1$ ), в которой ось  $X_1$  направлена вдоль простирания анизотропной толщи, ось  $Z_1$  - вертикально вниз, а ось  $Y_1$  располагается перпендикулярно плоскости  $XOZ$  (см. рис. 5). Вокруг оси  $X$  осуществляется поворот, причем матрица преобразования выглядит следующим образом:

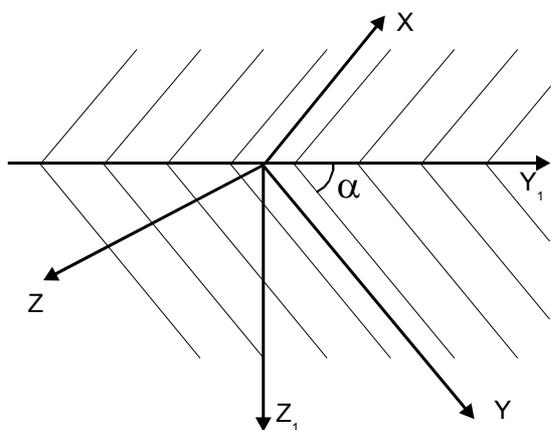


Рис.5.3.1. Первоначальная система координат, связанная со слоистостью.

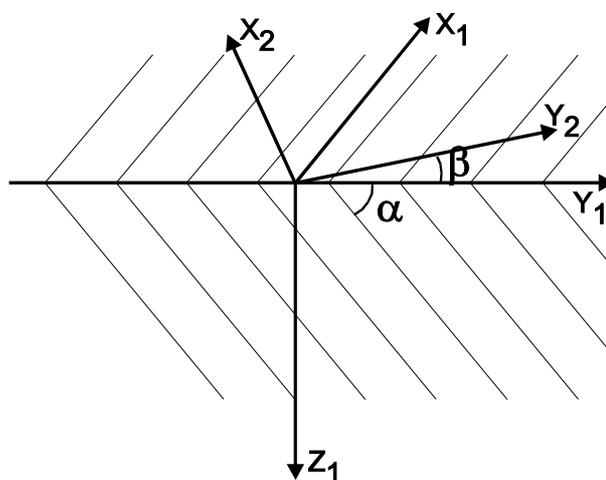


Рис.5.3.2. Переходная система координат. Ось  $X_1$  вдоль слоистости.

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{vmatrix}$$

где  $\alpha$  - угол падения анизотропной толщи.

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

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

$$\begin{vmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

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

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

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:

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

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

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

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

$$U_1 = U_1^{(1)} + U_1^{(2)} = \frac{I \rho_1}{2\pi r_1} + \frac{I' \rho_1}{2\pi r_1'}; \quad U_2 = \frac{I'' \rho_2}{2\pi r_2}.$$

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

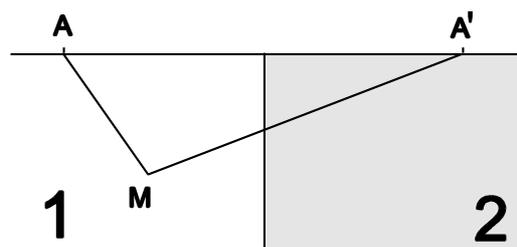


Рис.5.3.3. Мнимый источник тока  $A'$  в методе зеркальных отражений.

первой и второй среде от точечного источника, находящегося в первой среде. Затем записываются граничные условия, из них выводятся выражения для  $\Gamma'$  и  $\Gamma''$ . 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 источнике:

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

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:

$$U_1 = U_2;$$

$$J_n^{(1)} = J_n^{(2)}.$$

Для нашего случая орт  $\bar{I}_n = \bar{I}_x$ , 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 простирания 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:

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

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

$$U_2 = \frac{I'' \rho_l^{(2)}\sqrt{\rho_n^{(2)}}}{2\pi \cdot \sqrt{\rho_l^{(2)}(x''^2 + y''^2) + \rho_n^{(2)} \cdot z''^2}};$$

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

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

$$= \frac{\rho_l^{(1)}\sqrt{\rho_n^{(1)}}}{2\pi \cdot r \cdot \sqrt{\rho_l^{(1)}(\cos^2 \beta_1' + \cos^2 \alpha_1' \cdot \sin^2 \beta_1') + \rho_n^{(1)} \cdot \sin^2 \alpha_1' \cdot \sin^2 \beta_1'}},$$

где

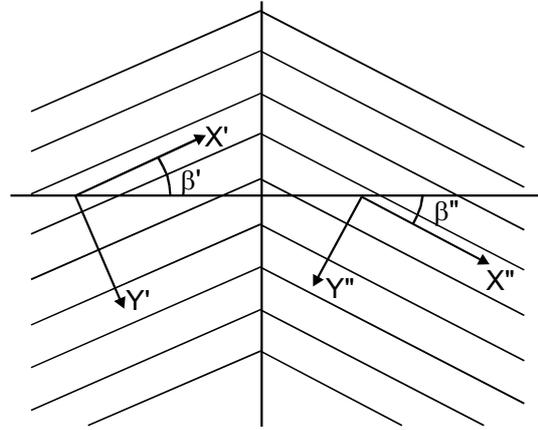


Рис.5.3.4. Системы координат в случае контакта двух анизотропных сред.

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

где  $\varphi$  - азимут разности относительно профиля.

Коэффициент при  $I''$  :

$$\frac{\rho_l^{(2)} \sqrt{\rho_n^{(2)}}}{2\pi \cdot r \cdot \sqrt{\rho_l^{(2)} (\cos^2 \beta'_2 + \cos^2 \alpha'_2 \cdot \sin^2 \beta'_2) + \rho_n^{(2)} \cdot \sin^2 \alpha'_2 \cdot \sin^2 \beta'_2}} .$$

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

Запишем выражение для  $J_x$ :

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

Здесь

$$\begin{aligned}J_{x'} &= \sigma_{x'x'} \cdot E_{x'} , & J_{y'} &= \sigma_{y'y'} \cdot E_{y'} , & J_{z'} &= \sigma_{z'z'} \cdot E_{z'} , \\ \sigma_{x'x'} &= \frac{1}{\rho_l} , & \sigma_{y'y'} &= \frac{1}{\rho_l} , & \sigma_{z'z'} &= \frac{1}{\rho_n} ,\end{aligned}$$

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:

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

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

где

$$\begin{aligned}k_1' &= -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\rho_l^{(1)} \cdot \sqrt{\rho_n^{(1)}}}{\left(\rho_l^{(1)} \cdot (x'^2 + y'^2) + \rho_n^{(1)} \cdot z'^2\right)^{\frac{3}{2}}} ; \\ k_2' &= -\frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\rho_l^{(2)} \cdot \sqrt{\rho_n^{(2)}}}{\left(\rho_l^{(2)} \cdot (x''^2 + y''^2) + \rho_n^{(2)} \cdot z''^2\right)^{\frac{3}{2}}} ;\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}x' &= x \cdot \cos \alpha_1 + y \cdot \sin \beta_1 ; \\y' &= -x \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 + y \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 + z \cdot \sin \alpha_1 ; \\z' &= x \cdot \sin \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 - y \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 + z \cdot \cos \alpha_1 .\end{aligned}$$

Аналогично для второй среды:

$$\begin{aligned}x'' &= x \cdot \cos \alpha_2 + y \cdot \sin \beta_2 ; \\y'' &= -x \cdot \cos \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 + y \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos \beta_2 + z \cdot \sin \alpha_2 ; \\z'' &= x \cdot \sin \alpha_2 \cdot \sin \beta_2 - y \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \beta_2 + z \cdot \cos \alpha_2 .\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}a_1 \cdot I' + b_1 \cdot I'' &= c_1 ; \\a_2 \cdot I' + b_2 \cdot I'' &= c_2 ,\end{aligned}$$

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 AnisCont (Vertical Contact of two Anisotropic media), 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 с помощью расчетов потенциалов и кажущихся сопротивлений вблизи контакта двух изотропных толщ и в однородной анизотропной среде.

Кроме того, были проверены граничные условия и условия на источнике; а также "зеркальность" эллипсов для случая симметричной среды.

Необходимо отметить, что в алгоритме программы AnisCont профиль, по которому проводятся измерения, перпендикулярен контакту двух анизотропных сред. В этом случае контакт направлен вдоль оси  $Y$  (с севера на юг), профиль - вдоль положительного направления оси  $X$  слева направо (с запада на восток), а началом координат является точка пересечения разлома (контакта) и профиля. В программе предусмотрено использование следующих установок. Их начальный азимут направлен вверх (на север), поворот азимута осуществляется по часовой стрелке. Падение анизотропной толщи при углах падения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  считается вправо, в восточном направлении, а при углах от  $0^\circ$  до  $-90^\circ$  влево, в западном направлении

1. Симметричная четырехэлектродная установка. Вращение установки вокруг центра MN.
2. Трехэлектродная установка AMN, В - в бесконечности. Вращение - вокруг центра MN.
3. Потенциал - установка AM, электроды N и В в бесконечности. Поворот питающего электрода А происходит вокруг приемного электрода М.
4. Дипольная осевая установка MNAB. 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 AnisCont был получен ряд интересных результатов 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 азимутальных наблюдений электрического поля вблизи контакта двух анизотропных сред, что является очередным шагом вперед по сравнению с ранее решенными задачами.

2. Вблизи контакта двух анизотропных сред наблюдается искажение круговых диаграмм кажущегося сопротивления, которое выражается в появлении дополнительных максимумов, соответствующих простиранию пород в соседней анизотропной толще (рис. 5.3.5).

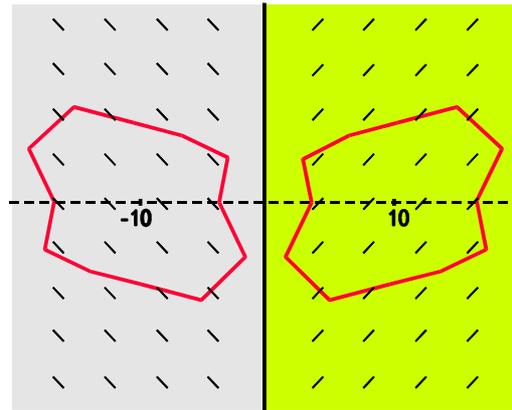


Рис.5.3.5. Азимутальные диаграммы вблизи контакта анизотропных сред.

#### 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 трудоемкой 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) и 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 подбора. 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 М точечного источника, расположенного в точке А на поверхности однородного 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;  $\beta$  - угол между прямой соединяющей точки А и М и направлением простирания пород анизотропной толщи,  $\rho_N$  - сопротивление однородного анизотропного полупространства вкrest слоистости,  $\rho_T$  - сопротивление однородного анизотропного полупространства вдоль слоистости. Угол падения пластов ( $\alpha$ ) 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  $\rho_K^T$  и экспериментальной  $\rho_K^Э$  вычисляется по формуле:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\rho_{Ki}^Э - \rho_{Ki}^T}{\rho_{Ki}^Э} \right)^2} \cdot 100\%,$$

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  $\rho_N$ ,  $\rho_T$ ,  $\beta$ . Их графики приведены на рисунке 5.4.1. Расчеты показали, что частная производная по параметру  $\beta$  имеет достаточно малые значения (приведенные на графике значения увеличены в 10 раз), а частные производные по параметрам  $\rho_N$  и  $\rho_T$  сильно коррелируют и гораздо больше по величине. Эти особенности поведения частных производных были учтены при построении алгоритма. Алгоритм нахождения вектора параметров  $\rho_N$ ,  $\rho_T$ ,  $\beta$  состоит из трех основных этапов. На первом этапе производится грубая оценка продольного -  $\rho_T$  и поперечного  $\rho_N$  сопротивлений среды, на втором этапе - подбор угла простирания пород -  $\beta$ , а на третьем этапе - уточнение сопротивлений  $\rho_N$  и  $\rho_T$ .

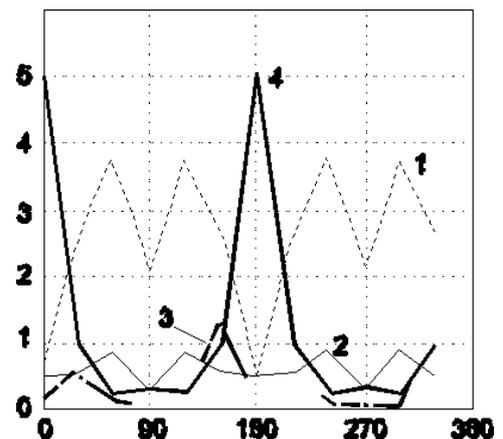


Рис.5.4.1. Частные производные  $\rho_K$  по  $\rho_N$  (1),  $\rho_T$  (2),  $\beta$  (3) и  $\rho_K$  КЭП (4)

За исходное направление простирания пород выбирается такое направление, на котором зафиксировано максимальное значение  $\rho_K$ . Кроме того, мы располагаем некоторым сектором С, ограниченным двумя направлениями с наибольшими значениями  $\rho_K$ , 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  $\rho_N$  и  $\rho_T$ . По окончании процесса минимизации мы получаем вектор параметров  $\rho_N^*$ ,  $\rho_T^*$ ,  $\beta^*$ , 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.

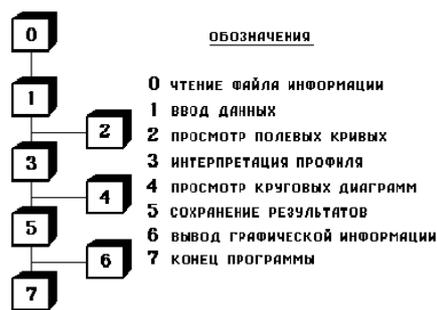


Рис.5.4.2. Схема программы CRM

В программе реализована визуализация результатов на экране дисплея в виде круговых диаграмм и выдача графической информации на принтер. Обработка и интерпретация 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.

### Результаты тестирования программы

Программа CRM тестировалась с помощью серии теоретических кривых  $\rho_K$  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%.

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  $\rho$  (для ДЭП - 8%), и не превышают  $1^\circ$  для угла  $\beta$ .

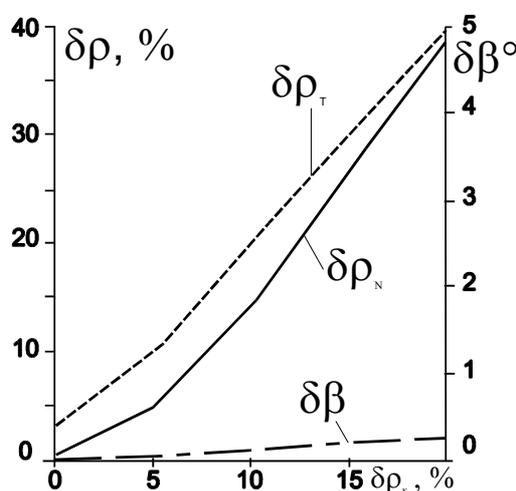


Рис.5.4.3. Зависимость ошибок в оценках параметров от ошибок в  $\rho_K$ .

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.

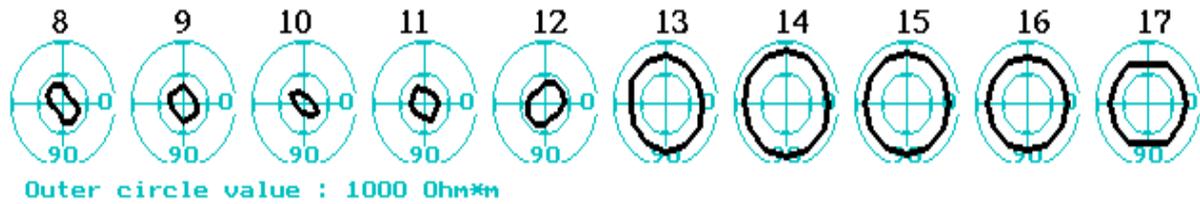


Рис.5.4.4. Круговые ЭП по профилю на плато Патиль.

На рисунках 5.4.4 и 5.4.5 приведены результаты кругового СЭП по профилю длиной 200 м через контакт пород таврической серии ( $\rho$  пород около 50 Ом.м) и перекрывающих их горизонтально залегающих известковистых 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  $\rho$ , т.к. на анизотропном полупространстве появился горизонтально - залегающий слой со значительно более высоким  $\rho$ . 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

$\rho_N$  и  $\rho_T$  (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 тонкий, разбит многочисленными трещинами и в результате кроме анизотропии здесь заметно влияют горизонтальные неоднородности разреза.

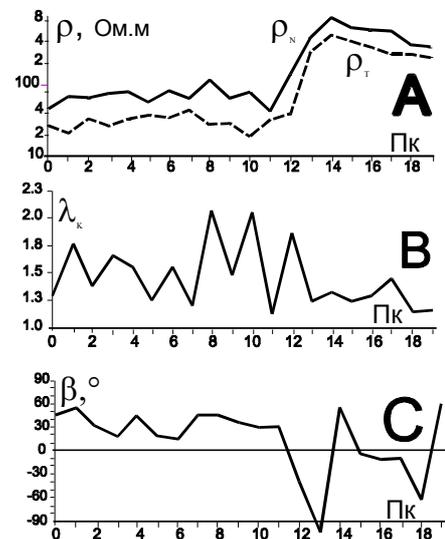


Рис.5.4.5. Результаты КЭП в Крыму.

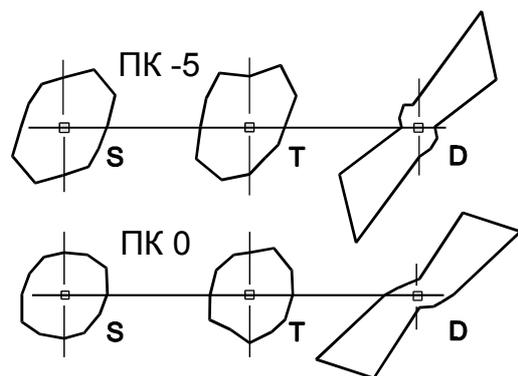


Рис.5.4.6. Диаграммы КЭП для ПК - 5 и 0.

На рис.5.4.6 показаны результаты наблюдений на 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	$\rho_N$	$\rho_T$	$\beta$	$\lambda$
-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  $\lambda$ ). 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. Выявление малоамплитудных тектонических зон является в

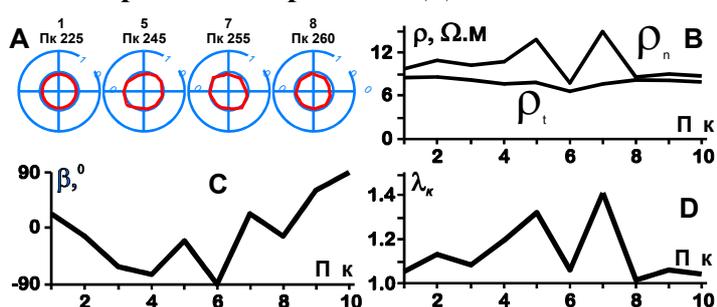


Рис.5.4.7. Результаты КЭП в г. Донецке.

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-Д 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  $\rho_t$  невыразителен, а  $\rho_N$  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  $\lambda$  (рис. 5.4.7,Д) максимальная вытянутость диаграмм отмечается в точках 5 и 7. При уровне фона  $\lambda$  1.05-1.1 в аномальных точках  $\lambda$  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  $R_k$  приведены на рисунке 5.4.8. При интерпретации выделено преобладающее направление трещиноватости перпендикулярное простиранию дамбы.

Результаты интерпретации позволяют сделать вывод, что при эксплуатации водохранилища

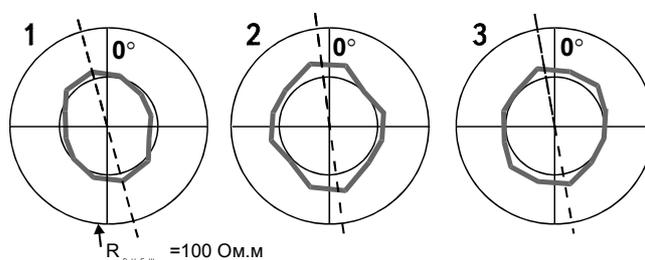


Рис.5.4.8. Круговые диаграммы по ДЭП.

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  $\rho_n=19$ ,  $\rho_l=13$ ,  $\lambda=1.2$ . 2. Построена модель трещиноватой водо-насыщенной 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 м<sup>2</sup>: 100 м<sup>3</sup>/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. 1972 г., 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. №3. 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-B87. 10 с.
47. МЫЦИК Н.В. Алгоритм интерпретации кривых вертикальных электрических зондирований // Геол. и геогр. Минск, 1984. №6. 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 геофизика. 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 электроразведки 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-В92. 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 3262В-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., Недра. 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 неоднородностей 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 A.A.R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves // Geophysics. 1989. Vol.54. N2. P. 245-253.