

ОАО

“56 Институт Инженерных Изысканий”

Разрешаю на депонирование

Генеральный директор

_____ А.В. Шульго

УДК 550.837.311

И.П.МОРГУН

РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ

ЗАДАЧ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

(МОНОГРАФИЯ)

Автор: _____ И.П. Моргун

Москва 2005

Печатается в соответствии с решением Научно-технического совета ОАО “56 Институт Инженерных Изысканий” от 16 мая 2005 г.

Начальнику Отдела депонирования
ВИНИТИ

Болашевой Н. И.

Уважаемая Нина Ивановна !

ОАО “56 Институт Инженерных Изысканий” просит Вас принять на депонирование рукопись нашего сотрудника , Моргуна Ивана Павловича - кандидата геолого-минералогических наук

“Решение инженерно-геологических и гидрогеологических задач методами электроразведки”

Генеральный директор

А. В. Шульго

Исп. Кокоулин Н. П.
Тел. 526-49-88

ВВЕДЕНИЕ

Трудно представить проведение инженерно-геологических и гидрогеологических исследований без привлечения геофизических наблюдений. В комплексе геофизических методов при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач лидирующее положение занимают сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ) и электроразведка методами вертикальных зондирований, с измерением кажущихся сопротивлений (ВЭЗ) и вызванных потенциалов (ВЭЗ-ВП).

Электрическое зондирование методом сопротивлений (ВЭЗ) и поляризуемости (ВЭЗ-ВП) основаны на применении постоянного тока. Их объединяют общие теоретические основы. Метод ВЭЗ-ВП возник как “производный” от метода ВЭЗ, от достигнутого на момент зарождения ВЭЗ-ВП определенного теоретического уровня ВЭЗ.

Простота проведения полевых работ методом ВЭЗ, возможность их выполнения в пешеходном варианте при глубинах исследования более 100 метров, расчленение геологического разреза по величинам удельных электрических сопротивлений – все это обеспечивает методу ВЭЗ ведущее положение в общем комплексе малоглубинных геоэлектрических методов. Применение ВЭЗ-ВП сдерживает их проведение только в автомобильном варианте, малая глубинность исследования (до 20 – 30 метров) и высокая стоимость работ.

Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП и ВЭЗ наиболее эффективна при разумном сочетании палеточных и компьютерных операций [45].

При экономической целесообразности полевые наблюдения ВЭЗ и ВЭЗ-ВП могут быть выполнены с установкой А-пост. MN(B→). Проведение наблюдений с трехэлектродной установкой AMN(B→) при всех ее неудобствах, обусловленных выносом электрода В в “бесконечность”, в два раза сокращает интервал осреднения (от АВ – для четырехэлектродной симметричной установки до АМ или АN) исследуемого геоэлектрического разреза и тем самым как бы приближает реальные геологические условия к горизонтально-слоистому разрезу. Для развития этого направления автором разработаны модификации ВЭЗ – ВЭЗ-ИЛРП и ВЭЗ-ВП – ВЭЗ-ВП (ИЛРП), позволяющие получать три наблюденно-расчетные кривые ρ_k и η_k : потенциал-зондирования; градиент-зондирования (обычные кривые ρ_k - ВЭЗ и η_k – ВЭЗ-ВП); производные по $S_k(x)$.

Представленная работа является результатом многолетних исследований автора по развитию полевых и камеральных работ методами вертикальных электрических зондирований по сопротивлению (ВЭЗ) и поляризуемости (ВЭЗ-ВП).

Настоящая работа может быть использована при переподготовке инженеров – производителей и включена в вузовский план инженеров-электроразведчиков.

За получение необходимых консультаций в 2002 – 2003 годах на Кафедре Геофизики Геологического факультета МГУ автор выражает искреннюю благодарность В.К.Хмелевскому, И.Н.Модину, Б.П.Петрухину, А.А.Бабачеву.

Глава 1. Физико-химические основы и установки электрических зондирований методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП

1. 1 Удельное электрическое сопротивление и удельная электрическая поляризуемость горных пород

Основу целесообразности применения методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП определяет различие пород геологического разреза по величинам удельных электрических сопротивлений и поляризуемостей горных пород.

Удельное электрическое сопротивление породы определяется как сопротивление куба, со стороной 1 метр, постоянному току, протекающему между его противоположными гранями, и измеряется в **Омм**. Величина, обратная удельному сопротивлению, характеризует удельную электрическую проводимость, измеряемую в **Си / м** – сименс на метр [12]. Удельная проводимость осадочных горных пород зависит не только от их структуры, водонасыщенности, минерализации насыщающих поры вод, но и от температуры, глубины залегания и техногенных воздействий на горные породы [67].

Фактически, электропроводность горных пород определяется количеством, характером распределения и степенью минерализации содержащихся в них природных водных растворов.

При определении зависимости удельного электрического сопротивления пород от их пористости, водопроницаемости и коэффициента фильтрации установлено [37], что эта связь может быть определена только в каждом частном случае - корреляционным способом.

Вызванная поляризация горных пород – это их способность поляризоваться под воздействием внешнего электрического поля. Она оценивается безразмерным коэффициентом поляризуемости - $\eta = \Delta U_{вп} / \Delta U_{пр}$, где $\Delta U_{пр}$ – разность потенциалов поляризуемого поля, $\Delta U_{вп}$ – разность потенциалов спадающего со временем поля

поляризации после выключения поляризующего тока. Обычно поляризуемость выражается в процентах.

Поле поляризации имеет электрохимическое происхождение, создается импульсами постоянного тока. Коэффициент η является амплитудной характеристикой спада поляризации и, если принимается как параметр, то должен быть привязан к определенному моменту спада наведенного поля (после выключения поляризующего тока).

Нисходящая кривая спада $\Delta U_{вп}$ находится в тесной связи с составом и структурой горной породы, испытывая на себе зависимость в начальной стадии спада от структуры кристаллической решетки минералов, составляющих горную породу, затем от минерализации вод, частично или полностью заполняющих трещины и поры, от двойного электрического слоя вокруг твердых частиц (от микрочастиц до песка). Достаточно подробно это рассмотрено в работах В.А. Комарова [25, 26], Д.А. Фридрихсберга и М.П. Сидоровой [57], В.В. Жаворонковой и В.В. Кормильцева [18], И.И. Рокитянского [50], М.Г. Латышовой [30], В.Н. Дахнова, М. Г.Латышовой, В.А. Ряполовой [13] и многих других исследователей.

При использовании метода ВП для решения гидрогеологических и инженерно-геологических задач большинством исследователей принимается, что спад поляризуемости осадочных пород хорошо описывается суммой экспонент [37]

$$\eta = \sum n_{ei} * e^{-(t/\tau_{en})} . \quad (1.1 . 1)$$

где $\eta_{e,i}$ и τ_{en} – параметры, не зависящие от времени спада t ; i – номер члена ряда, один из числа процессов, участвующих в создании эффекта вызванной поляризации; $\tau_{вп}$ – постоянные времени спада для каждой экспоненты

Для осадочных пород выявлены следующие закономерности [37, 67]:

1. Поляризуемость - η зависит от концентрации и химического состава поровых вод. Увеличение концентрации солей приводит к уменьшению поляризуемости, обратно пропорциональному корню квадратному из концентрации. У влагонасыщенных пород, имеющих удельное сопротивление до 100 Ом, поляризуемость возрастает прямо пропорционально сопротивлению.
2. В песчано-глинистых породах поляризуемость определяется, преимущественно, содержанием и типом пылеватых и глинистых частиц. Наибольшая величина поляризуемости наблюдается при содержании в породе от 3 до 10 % глины.
3. Максимум поляризуемости влагонасыщенных грунтов достигается при 2 – 5 % объемной влажности; не монотонна зависимость поляризуемости от гранулометрического состава и структуры пород.

Разложение спада потенциала $\Delta U_{вп}$ на 2 – 3 экспоненты описано В.А. Ряполовой [36]. Более четкое разложение кривых спада потенциала $\Delta U_{вп}$ может быть при скваженных, точечных во времени, наблюдениях $\Delta U_{вп}$ (при закрепленном положении зонда). По результатам таких работ Экспедиции № 30 ПГО “Гидроспецгеология” на Гмелинской оросительной системе в Саратовском Заволжье установлено, что ближайшая по времени экспонента (при наблюдении спада с 0.5 секунд после выключения тока) характеризует степень минерализации пластовых или частично заполняющих поры вод, а вторая и третья экспоненты зависят от литологического состава пород исследуемого интервала разреза. При минерализации обводненных горизонтов 2 – 3 г / литр постоянные времени изменялись : по первой экспоненте от 1.15 до 3.4 сек.; второй экспоненты – от 3.1 до 18 сек. ; третьей экспоненты – от 8 до 20 сек..

По результатам разложения величин спада $\Delta U_{вп}$ на всех наблюдаемых разносах ВЭЗ-ВП могут быть построены кажущиеся кривые каждого из 2 – 3 - ёх временных параметров [36]. Такой подход более перспективен, чем расчет и построение кривой одного осредненного временного параметра [52].

1. 2. Установки электрических зондирований методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП

При вертикальном электрическом зондировании методом ВЭЗ наблюдения чаще всего выполняются с четырехэлектродной симметричной установкой АМNB. Исследование на глубину достигается за счет увеличения длины питающей линии АВ, с сохранением неизменных величин приемной линии MN на нескольких разносах АВ. Величину кажущегося сопротивления - ρ_k рассчитывают по измеряемой разности потенциалов - ΔU в приемной линии MN, силе тока в питающей линии АВ - I, с учетом коэффициента установки

$$\rho_k = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (1. 2. 1.)$$

Кривые зондирования - ρ_k строят на билогарифмическом бланке в координатах - ρ_k и АВ/2. Точкой разноски результатов интерпретации по вертикали является центр установки АМNB.

В отдельных случаях, при неблагоприятных геоморфологических условиях, наблюдения ВЭЗ рекомендовалось [66] выполнять с трёхэлектродной однополюсной (ОЗ) установкой АМN(В→∞), с центром установки – центром электродов MN. При этом электрод В необходимо относить по перпендикуляру к разматываемым электродам MN и А на 5 - 10 величин максимального разноса электрода А. Для однополюсной трёхэлектродной установки

$$K = 2 * \pi * \frac{AM * AN}{MN} \quad (1. 2. 2)$$

Отметим, что для симметричной четырёхэлектродной установки

$$K = \pi * \frac{AM * AN}{MN} . \quad (1. 2. 3)$$

Уменьшение ΔU в два раза, по сравнению с четырёхэлектродной установкой, наряду со сложностью разноса электрода $B \rightarrow \infty$, оценивалось [66] как недостаток трёхэлектродной установки.

Автор, напротив, считает, что выполнение работ с трёхэлектродной установкой $AMN(B \rightarrow \infty)$, только при неподвижном питающем электроде А, открывает новые возможности в совершенствовании электроразведки методом ВЭЗ. Такую установку назовем ВЭЗ-ИЛРП (измерение лучевой разности потенциалов).

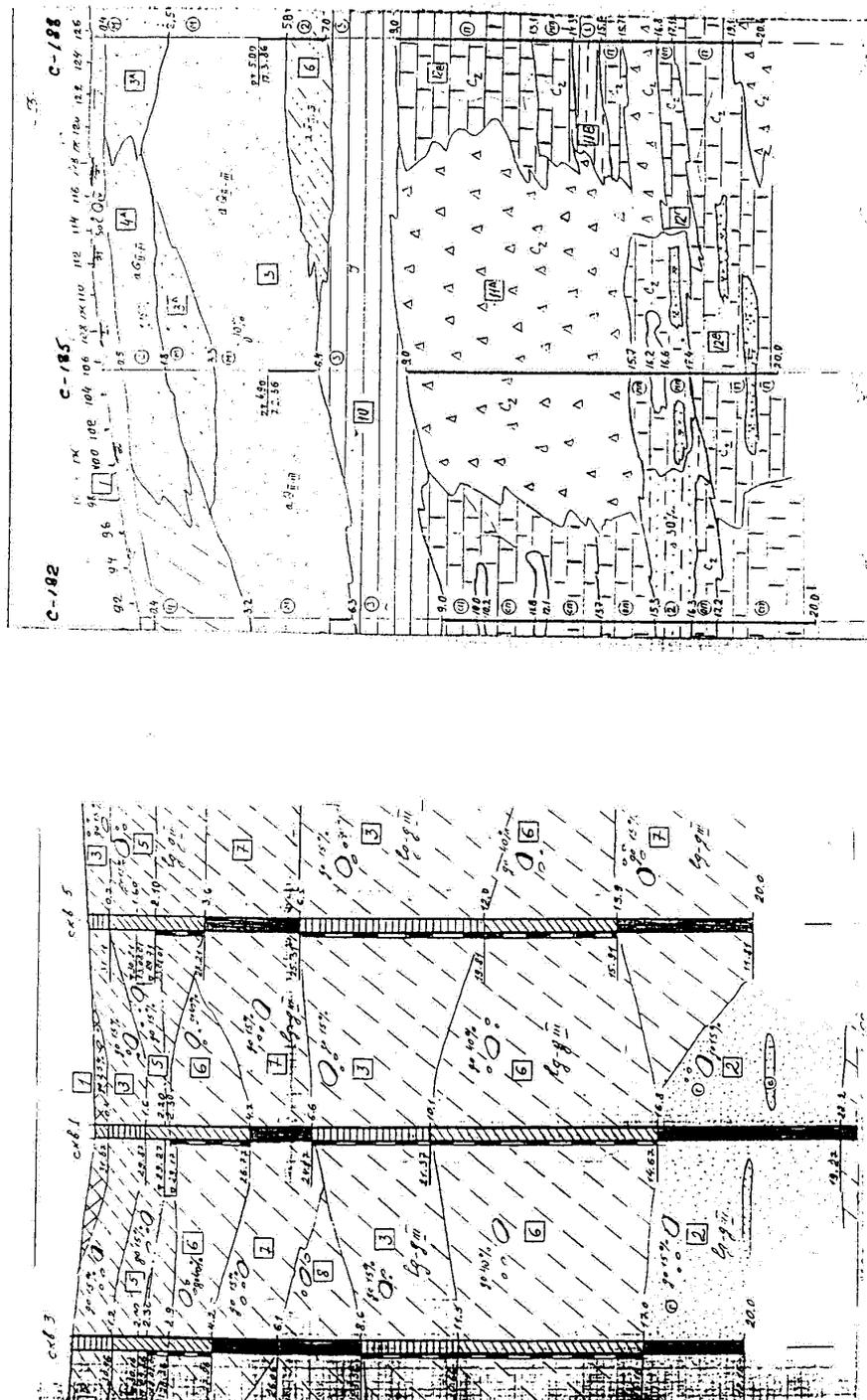
При работах методом ВЭЗ с симметричной установкой $AMNB$ наблюдаемые значения ρ_k осредняют в себе состояние среды по горизонтали между питающими электродами А и В. В реальных условиях геологический разрез в точках размещения электродов А, В и в интервале между ними чаще всего может различаться (рис. 1. 2. 1). Следовательно, при работе с сокращенной в два раза по линии наблюдения установкой $AMN(B \rightarrow \infty)$, достоверность результатов наблюдений может быть улучшена. Кроме того, как это будет показано ниже, при работе с неподвижным питающим электродом А наибольший вклад в суммарное отражение и соответственно в наблюдаемое значение ρ_k вносит первая – ближайшая к электроду А половина геоэлектрической границы.

Методика наблюдений ВЭЗ-ИЛРП (ВЭЗ-профилирования, как это определено в начале их проведения) была разработана и опробована автором в 1986 г. , с 10 июня по 4 июля, при инженерно-геологических изысканиях под гражданское строительство в г. Щёлково на участке “Микрорайон “Заречный” (фонды ОАО «56 ИИИ» , инв. № 2596, 1986 г.) .

Исходные ее положения определены из следующих соображений. Пусть на участке с горизонтальным дневным рельефом и известной наклонной геоэлектрической границей двухслойного разреза необходимо сравнить кривые ρ_k ВЭЗ градиент-зондирования и потенциал-зондирования, наблюдаемые в некоторой точке А с трёхэлектродной установкой $AMN(B \rightarrow \infty)$, **по падению и восстанию границы.**

При наблюдении кривых ρ_k градиент-зондирования результаты измерений относятся к центру (точке О) электродов MN , перемещаемому со стандартным для ВЭЗ шагом (АО), аналогичным шагу $AB/2$, и соответствующими величинами MN . Расчет значений ρ_k выполняется по формуле для трёхэлектродной градиент установки AMN при $B \rightarrow \infty$ [66] . Понятно, что кривые $\rho_k^{ГЗ}$, полученные по падению и восстанию геоэлектрической границы

будут различными. Степень их различия находится в прямой зависимости от величины угла падения геоэлектрической границы. Точкой привязки ВЭЗ на плане является точка А.



а) уз-к "Северный" б) уз-к МКР "Заречный" г. Щелково

Рис. 2.1.1. Инженерно-геологические разрезы по участкам «Северный» и МКР «Заречный» г. Щелково

Направление разностей АО отмечается на плане азимутальной линией – лучом. Таким образом, для этого случая мы уже можем говорить о лучевой (азимутальной) электроразведке ВЭЗ (с градиент-установкой).

Далее, мы задались целью выполнить по этим двум азимутам-лучам наблюдение кривых $\rho_k^{\text{ПЗ}}$ ВЭЗ потенциал-зондирования. Но как? В работе [17] описано, что необходимые для подстановки в формулу

$$\rho_k^{\text{ПЗ}} = (U/I) * 2 * r, \quad (1.2.4)$$

(где I – сила тока в цепи АВ, U – разность потенциалов между электродами M и N двухполюсной установки АМ ($B \rightarrow \infty, M \rightarrow \infty$),

r – расстояние между электродами АМ)

величины U могли бы быть получены только в том случае, если бы “потенциал электрода N ” был бы “практически равен нулю” [17] и на потенциал электрода M влияние электрода B практически отсутствовало бы [17]. В этом случае $\Delta U_{\text{АМ}}$ равнялось бы U_M и результатом наблюдения могли бы быть не только величины $\rho_k^{\text{ПЗ}}$, но и приведённые к силе тока в 1 Ампер значения приведённого потенциала

$$U\text{-привед.} = U / I \quad (1.2.5)$$

Для однородной среды

$$U / I = \rho_o / (2 * \pi * r). \quad (1.2.6)$$

Размерность U -привед. как и отношения величин U / I [Ом = Вольт / Ампер]. Как показали проведённые автором исследования получаемые теоретические графики U -привед. для многослойных горизонтально-слоистых сред близки к нисходящим гиперболам или в общем виде к графикам кусочно-гиперболических функций.

Здесь подчеркнем, что при зависимости $U / I = f(1 / r)$, относящейся к классу гиперболических функций, более закономерной для теоретических и модельных исследований является функция – S , обратная (U / I). Для однородной среды согласно (1.2.6)

$$S_o = 2 * \pi * r * \sigma_o, \quad (1.2.7)$$

где $\sigma_o = 1 / \rho_o$ – проводимость изотропной среды. Соответственно, для многослойной среды заменяя σ_o на σ_k получим

$$S_k = 2 * \pi * r * \sigma_k \quad (1.2.8)$$

Понятно, что проводить работы по получению наблюдаемых кривых $\rho_k^{\text{ПЗ}}$ ВЭЗ непосредственно с выносом электрода N в “бесконечность” невозможно (высокие некомпенсируемые величины естественного поля и др.). Поэтому величины потенциала в каждой точке установки электрода M_i , (где i – номер установки электрода M ,

измеряемый от 1 – первой ближайшей к электроду А точке установки электрода M_1 до j – последней точки установки электрода M_j могут быть получены в результате суммирования : 1) разности потенциалов ΔU_{MN} при постоянной величине тока, а при изменяемой величине тока – разности приведенных потенциалов $\Delta U / I$ на электродах MN ; 2) поправки $\epsilon_0 = \Delta U_{M(j+1) N(j+1) \rightarrow \infty}$, компенсирующей отклонение $U_{N(j)}$ от нуля на “бесконечности”. Суммирование выполняется от последней установки электродов $M_j N_j$ до первой $M_1 N_1$ по двум лучам наблюдений от закреплённого электрода А : первому – по падению геоэлектрической границы; второму – по ее восстанию. Приемные электроды MN перемещаются от электрода А с заданными, последовательно изменяющимися расстояниями между М и N, с пошаговым (непрерывным) переходом электрода М в предшествующую точку электрода N.

Практически, при инженерно-геологических изысканиях под строительство вынос электрода В (по перпендикуляру к линии наблюдения) составляет 300 – 400 метров и длина луча перемещения электродов MN равна 40 – 60 метров. При изменяемых величинах тока результаты измерения разности потенциалов на каждой установке MN обязательно приводятся к силе тока в 1 Ампер. При этом величина U-привед. на конечной точке измерения (конечной точке N) условно принимается равной величине приведенной (к 1 Амперу) разности потенциалов на конечном шаге электродов MN . Суммируя полученные значения $\Delta U / I$ на каждом шаге MN , от конечного до начального, получаем последовательные значения U-привед. (для всех точек размещения электродов М и N) и их графики, близкие к графикам кусочно-гиперболических функций. При укороченных (до 40 – 60 м.) линиях наблюдения всегда есть необходимость уточнения полученных величин U-привед..

Для уточнения положения нулевой линии к принятым значениям U-привед. [в Ом] вводится поправка ϵ -нуль, получаемая расчёно в соответствии с предложенной автором формулой

$$\epsilon\text{-нуль} = \frac{(x_3 - x_2) * U_{x_2}^0 * U_{x_3}^0 + (x_2 - x_1) * U_{x_1}^0 * U_{x_2}^0 - (x_3 - x_1) * U_{x_1}^0 * U_{x_3}^0}{(x_3 - x_1) * (U_{x_1}^0 + U_{x_3}^0) - (x_3 - x_2) * (U_{x_2}^0 + U_{x_3}^0) - (x_2 - x_1) * (U_{x_1}^0 + U_{x_2}^0)} . \quad (1.2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{U_{x_1}^0 + \epsilon} = A + b_1 * x_1 \\ \frac{1}{U_{x_2}^0 + \epsilon} = A + b_2 * x_2 \\ \frac{1}{U_{x_3}^0 + \epsilon} = A + b_3 * x_3 \end{array} \right. \quad (1.2.10)$$

где $U_{x1}^0, U_{x2}^0, U_{x3}^0$ - первичные значения U-привед. на заданных расстояниях – x_1, x_2, x_3 от источника тока. Введение поправки ε -нуль, определенной по значениям U_x^0 [в Ом] на серии последних разносов MN, позволяет провести близкую к истинной нулевую линию - начала координат исправленных значений U_x ; получить исправленные значения приведенного потенциала и расчетные по формуле (1.2.4) величины $\rho_k^{ПЗ}$ по падению и восстанию границы по двум лучам от точки А и выполнить необходимое сопоставление.

При профильных наблюдениях ВЭЗ-ИЛРП перемещение электрода А при переходе на последующую точку рекомендуется равным 10 – 20 м.. При этом график $U_x^n = f(x)$ близок к кусочно-гиперболической функции и, соответственно, обратно пропорциональная ей функция кажущейся суммарной продольной проводимости по оси X

$$Sk(x) = 1 / ((U / I) / (2 * \pi)) = 1 / (2 * \pi * U_x^n) \quad (1.2.11)$$

является кусочно-линейной или линейной на конечном – асимптотическом участке графика. Для однородной изотропной среды для функции Sk(x) справедливо выражение

$$Sk(x) = \sigma_0 * x, \quad (1.2.12)$$

где σ_0 - удельная электрическая проводимость изотропной среды. Размерность Sk(x) - [1/Ом] или [Си - сименс].

Для реальных геоэлектрических разрезов при профильных наблюдениях по исправленным величинам U_x^n получают расчетные величины Sk(x) и графики Sk(x) = f(x). На рис. 1.2.2 приведены полученные в результате проведенных работ на участке “Микрорайон “Заречный” встречные и нагоняющие графики величин Sk(x). В соответствии с принципом взаимности, по аналогии с сейсморазведкой МОВ, проводится увязка лучевых графиков Sk(x), с корректировкой отдельных графиков Sk(x) (и соответственно U_x^n) по результатам увязки во взаимных точках. По исправленным значениям U_x^n выполняется расчет значений ρ_k потенциал-зондирования и ρ_k градиент-зондирования. На рис. 1.2.3 приведен ход кривых ρ_k град.-зонд., полученных по наблюдениям ВЭЗ-ИЛРП на участке “Микрорайон “Заречный” при сгущенном и разреженном расстоянии между электродами MN. Выбрано оптимальное расчетное расстояние между электродами MN для построения кривых ρ_k град.-зонд, что было учтено при проведении работ ВЭЗ-ИЛРП на других участках. Так на участке "Северном" в Выборгском районе Ленинградской области при работах ВЭЗ-ИЛРП (в августе 2001 г) шаг MN составлял: 0.25 м (от 0.25 до 0.5 м); 0.5 м (от 0.5 до 1 м); 1 м (от 1 до 12 м); 2 м (от 12 до 24 м); 4 м (от 24 до 40 м). На опытном профиле ВЭЗ-ИЛРП (в сентябре 2001 г) приемные электроды MN перемещались по линии - лучу наблюдений (длиной 40 м) с шагом: 1) 0.5 м -- от 0.5 до 1.0 м; 2) 1.0 м -- от 1 до 12 м; 3) 2 м --

от 12 до 24 м; 4) 4 м -- от 24 до 40 м, при расстоянии между точками установки электрода А - 20 метров.

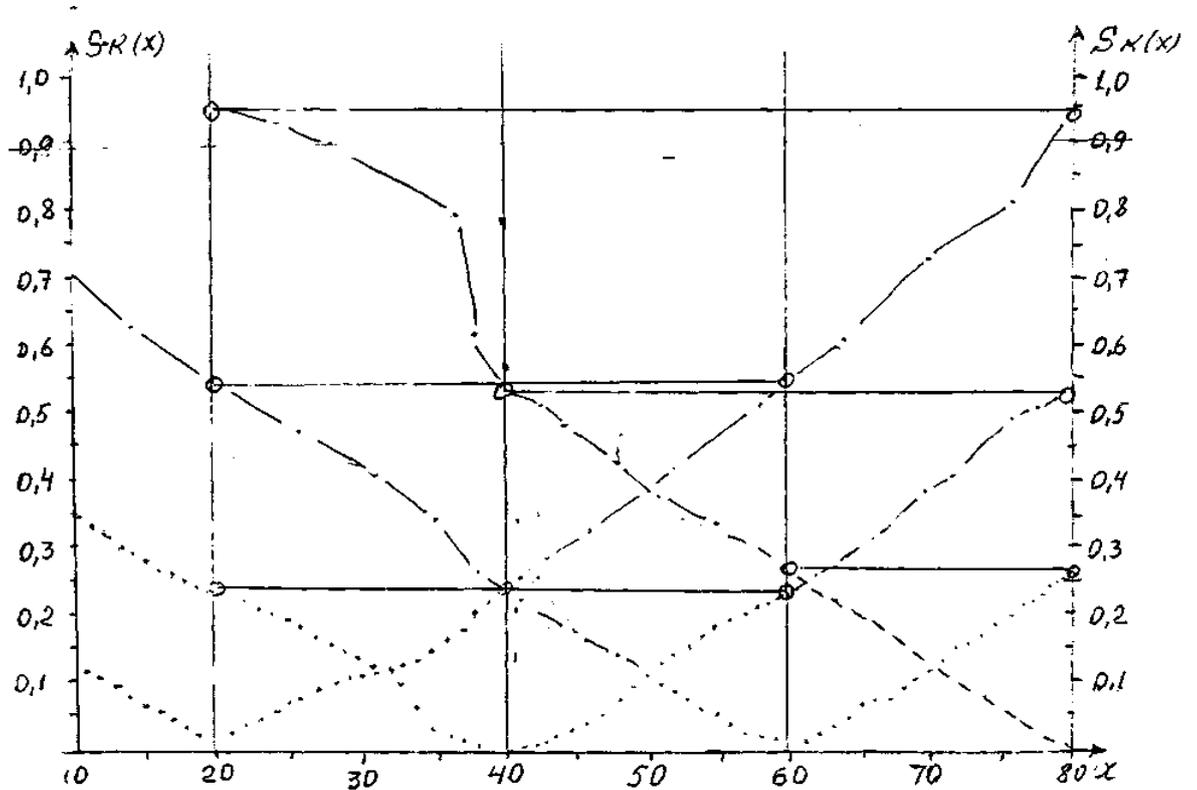


Рис.1.2.2. Графики $S_k(x)$ по профилю 3 (на участке МКР «Заречный» г. Щёлково), увязанные во взаимных точках

Предлагаемый автором метод измерения лучевой разности потенциалов - ВЭЗ-ИЛРП фактически является рождением новой - лучевой электроразведки ВЭЗ. Ее основой является принцип **взаимности**: 1) источника тока и точки измерения потенциала по величинам приведённого (к 1 Амперу) потенциала; 2) величинам $S_k(x)$ - обратных приведённым потенциалам; 3) ρ_k - потенциал-зондирования ($\rho_k \text{ п.-з.} = 2 * \pi * \text{АМ} * (U/I)$). При этом увязка графиков приведённого потенциала (U/I), величин $S_k(x)$ и $\rho_k \text{ п.-з.}$ выполняется по равенству соответствующих величин во взаимных точках. Разумеется, каждая точка наблюдения U/I , $S_k(x)$, $\rho_k \text{ п.-з.}$ (по теории зеркальных или вернее многократных отражений) является функцией всего интервала отражающей геоэлектрической границы или в большей

мере ближайшей к источнику тока половине при наклонных границах (как это будет показано ниже).

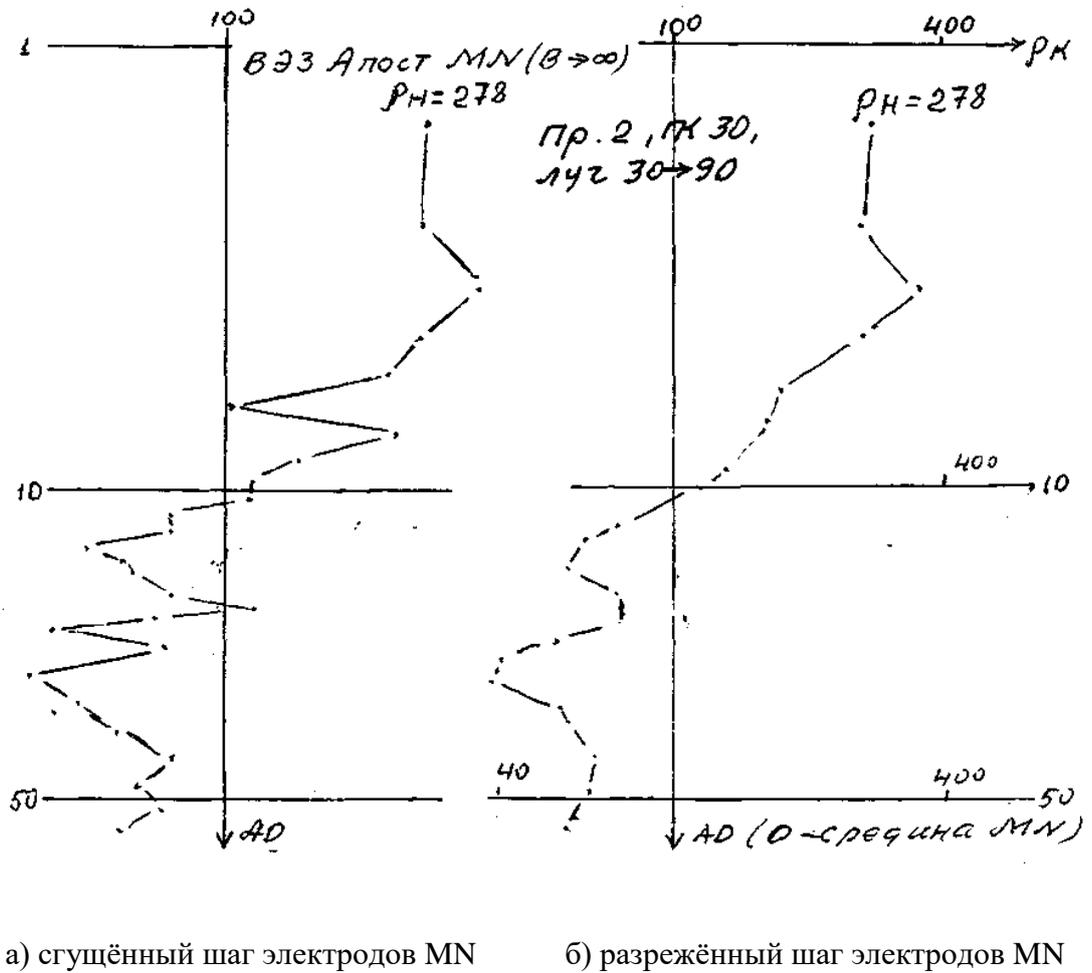


Рис.1.2.3. Кривые ρ_k -ВЭЗ, построенные на основе ВЭЗ-ИЛРП со сгущённым шагом электродов MN и разрежённым до 8 м. при построении второго варианта

Однако для реализации принципа взаимности увязку взаимных значений можно относить к половине расстояния между электродами А и М (или N). Естественно, это не вполне корректно. Но такой подход позволит представить сводные результаты количественной интерпретации кривых ВЭЗ в виде непрерывно коррелируемых разрезов, с привязкой полученных глубин к половине расстояния между А и М (или N), точнее к половине абсциссы соответствующих эквивалентных точек Н, К, А, Q. При этом в качестве дополнительного индикатора правильности непрерывной корреляции геоэлектрического разреза могут быть использованы увязанные во взаимных (встречных) точках $S_k(x)$.

В результате проведенных исследований автором предложена функция $\rho_k \text{пSk}(x)$, вначале опробования как обратная величина отношения линейных участков графиков $\Delta \text{Sk}(x)$ к соответствующим величинам Δx

$$\rho_k \text{пSk}(x) = 1 / (\Delta \text{Sk}(x) / \Delta x). \quad (1.2.13)$$

В процессе анализа по внедрению функции $\rho_k \text{пSk}(x)$ была составлена табл. 2.2.1 расчетных значений ρ_k производных по $\text{Sk}(x)$ по 6-ти лучам измерений ВЭЗ-ИЛРП на опытном профиле участка "Стадион" в г. Щёлково. Послойное соответствие отдельных элементов кривых ρ_k град.-зонд., ρ_k град.-потенц. зонд и $\rho_k \text{пSk}(x)$ на рис. 1.2.4 просматривается с большим трудом.

В соответствии с формулой (1.2.10) $\text{Sk}(x) = 1 / (2 * \pi * U / I)$ производную $(\text{Sk}(x))'$ определит выражение

$$(\text{Sk}(x))' = \left\{ \frac{1}{(U/I) * 2 * \pi} \right\}' = \frac{I}{2 * \pi} * (1/U)' = \frac{I}{2 * \pi} * (U)' / U^2 \quad (1.2.14)$$

Откуда, согласно [28], для двухслойной горизонтально-слоистой среды

$$(\text{Sk}(x))' = \frac{I}{2 * \pi} * \frac{\frac{\rho_1}{2 * \pi} * \{1/x^2 + 2 * \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K_{12}^n * x}{[x^2 + (2 * n * h_1)^2]^{3/2}}\}}{\left\{ \frac{\rho_1}{2 * \pi} * [1/x + 2 * \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{K_{12}^n}{[x^2 + (2 * n * h_1)^2]^{1/2}}] \right\}^2} = \frac{I}{2 * \pi} * \frac{E}{U^2} \quad (1.2.15)$$

и соответственно при $I = 1$ Амперу

$$(\text{Sk}(x))' = \frac{1}{2 * \pi} * \frac{\rho_k^{\gamma-3}}{(\rho_k^{\pi-3})^2} * \frac{(2 * \pi * x)^2}{2 * \pi * x^2} = \frac{\rho_k^{\gamma-3}}{(\rho_k^{\pi-3})^2} \quad (1.2.16)$$

при $x = AM$, $E = \rho_k \gamma-3 / (2 * \pi * x^2)$ и $U/I = \rho_k \pi-3 / (2 * \pi * x)$.

В итоге

$$\rho_k \text{пSk}(x) = 1 / (\text{Sk}(x))' = \frac{(\rho_k^{\pi-3})^2}{\rho_k^{\gamma-3}}. \quad (1.2.17)$$

Таблица 1.2.1 расчётных значений ρ_k - производных по $S_k(x)$
 ($\rho = 1 / (\Delta S_k(x) / \Delta x)$) по 6-ти лучам опытного профиля участка "Стадион"

NN	A0	AM – AN	ρ_k по $S_k(x)$ по лучам					
			80 --40 м	60--20 м	40--80 м	40--0 м	20 --60 м	0 --40 м
1	0.75	0.5-1.0	294.	417.	454.	454.	625.	714.
2	1.5	1-2	178.	333.	476.	476.	1667.	833.
3	2.5	2-3	133.		270.	303.	1111.	909.
4	3.5	3-4	102.	357.	244.	270.	909.	1111.
5	4.5	4-5	75.8	270.	189.	250.	1000.	1111.
6	5.5	5-6	66.7	250.	227.	189.	667.	1111.
7	6.5	6-7	46.9	175.	192.	169.	384.	667.
8	7.5	7-8	36.6	179.	122.	132.	384.	476.
9	8.5	8-9	33.9	159.	89.3	81.3	70.0	545.
10	9.5	9-10	26.6	141.	69.0	59.5	105.	625.
11	10.5	10-11	18.5	122.	68.0	35.8	118.	500.
12	11.5	11-12	18.6	76.3	58.5	24.9	82.0	270.
13	13.	12-14	14.04	65.1	48.3	17.8	68.0	247.
14	15.	14-16	10.96	53.2	40.0	27.5	25.7	161.
15	17.	16-18	12.36	26.6	32.8	23.3	13.3	102.
16	19.	18-20	11.47	14.5	31.2	24.6	19.4	76.6
17	21.	20-22	14.16	26.0	30.3	20.2	18.2	63.9
18	23.	22-24	14.06	23.2	26.0	15.6	13.5	27.2
19	26.	24-28	16.61	12.0	21.8	10.65	15.7	9.69
20	30.	28-32	15.38	3.83	40.3	5.60	12.3	5.66
21	34.	32-36	15.38		8.18	5.73	12.3	4.21
22	38.	36-40	15.32	90.9	3.91	3.97	10.2	3.21

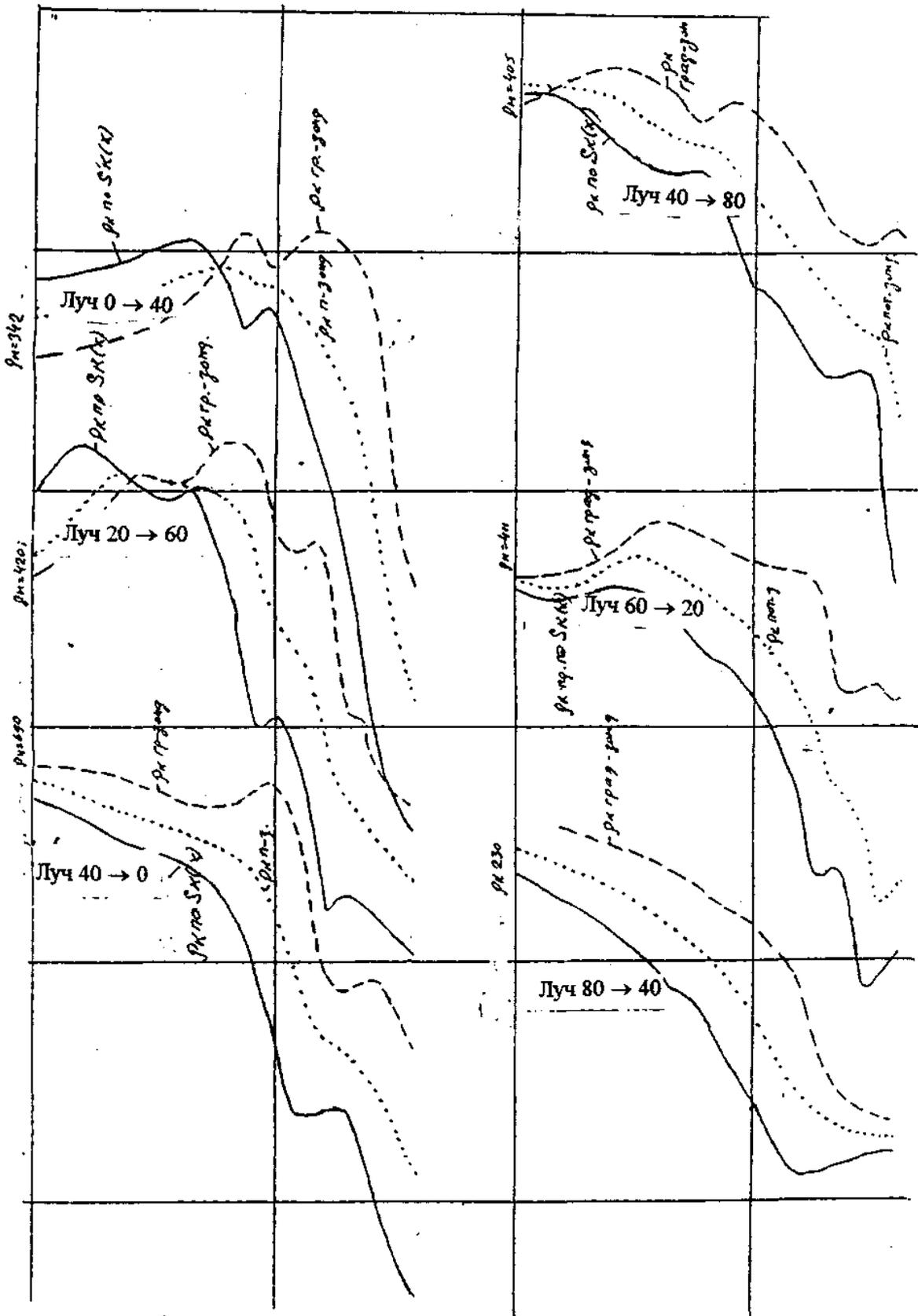


Рис. 1.2.4. Расчётные кривые r_k градиент-зондирования, потенциал-зондирования, производных по $S_k(x)$, полученных по результатам полевых наблюдений на опытном профиле участка «Стадион»

Необходимо отметить, что кривая ρ_k потенциал-зондирования является первичной, а две другие ее производными, со смещением точек экстремума вниз для кривой ρ_k град.-зонд. и вверх для кривой ρ_k производной по $S_k(x)$, делая последнюю более чувствительной по глубинности исследования.

Вертикальное электрическое зондирование методом ВЭЗ-ВП для повышения чувствительности измерений обычно выполняется с четырехэлектродной симметричной градиент-установкой Веннера ($MN - AB / 3$; $K = 2/3 * \pi * AB$).

Измеряемыми величинами в методе ВЭЗ-ВП являются: ток в питающей линии АВ; разность потенциалов - $\Delta U_{пр}$. между приемными электродами в момент пропускания тока через цепь АВ, и разность потенциалов $\Delta U_{вп}$, снятая на приемных электродах после выключения поляризующего тока. Результаты наблюдений методом ВЭЗ-ВП представляются в виде графиков $\eta_k = f(AB/2)$ и интерпретируются совместно с кривыми ρ_k . Как и в методе $\rho_k - ВЭЗ$, точкой разности результатов интерпретации кривых η_k по вертикали является центр установки АМNB.

Полевые наблюдения ВЭЗ-ВП могут быть более эффективными, если их выполнять с установкой А-пост. MN ($B \rightarrow \infty$). Как и в методе ВЭЗ-ИЛРП по результатам измерений $\Delta U_{пр}$, с введением поправки за ε -нуль, мы можем получить три кривые ρ_k (потенц.-зонд; град.-зонд; производной по $S_k(x)$) и дополнительно три кривые η_k (потенц.-зонд; град.-зонд; производной по $S_k(x)$). При этом сводные результаты интерпретации трёх кривых η_k относятся, как и данные интерпретации трёх кривых $\rho_k - ВЭЗ-ИЛРП$, к половине расстояния между электродами А и М (или N). Определение послойных значений удельной поляризуемости (η_i) по трём кривым η_k повысят надежность малоглубинных исследований ВЭЗ-ВП по изучению коэффициента фильтрации и других искомым параметров грунтов. Выполнение работ ВЭЗ-ВП на малых разностях MN, в отличие от традиционных наблюдений ВЭЗ-ВП с установкой Веннера, предъявляют повышенные требования к измерительной аппаратуре и определяют целесообразным проведение многократных цифровых измерений.

Глава 2. Расчет кривы ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для многослойных горизонтально-слоистых сред

2. 1. Расчет многослойных кривых ρ_k град.-зонд., потенц.-зонд. и производной по $S_k(x)$ для горизонтально-слоистых сред

Известно [34], что потенциал точечного источника на поверхности горизонтально-слоистой среды имеет выражение

$$U = \frac{I^* \rho_1}{2 * \pi} * \int_0^{\infty} R_1 * J_0(mr) dm, \quad (2.1.1)$$

где m - переменная интегрирования; r - разнос электродов АМ; $J_0(mr)$ - функция Бесселя первого рода нулевого порядка; R_1 - трансформата ρ_k (зависящая от сопротивлений и мощностей слоев). Напряженность потенциала

$$E = - \partial U / \partial r = \frac{I^* \rho_1}{2 * \pi} * R_1 * m * J_1(mr) dm, \quad (2.1.2)$$

где $J_1(mr)$ - функция Бесселя первого рода первого порядка.

Соответственно в интегральном представлении

$$\rho_k \text{ потенц.-зонд.} = \rho_1 * r * \int_0^{\infty} R_1 * J_0(mr) dm, \quad (2.1.3)$$

$$\rho_k \text{ град.-зонд.} = \rho_1 * r^2 * \int_0^{\infty} R_1 * J_1(mr) dm, \quad (2.1.4)$$

При решении прямой задачи ρ_k - ВЭЗ (ρ_k град.-зонд.) наиболее оптимальными явились представления ρ_k - ВЭЗ в виде обратного преобразования Ханкеля - линейной свертки $\rho_k(r) \rightarrow$ фильтр $\rightarrow A(y)$. Применение методов линейной свертки для расчета кривых ρ_k - ВЭЗ, как это уже было отмечено выше, описано в работах В.Н.Страхова [55], Д.Гхоша [69], П.Шалата [61], Н.В.Мыщика [46], Е.Б.Изотовой, Л.В.Егоровой, К.М.Ермохина [42], Е.Ш.Абрамовой [2], В.А.Шевнина [63]. Выполненное автором сравнение различных алгоритмов решения прямой задачи ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на основе свертки показало, что наиболее оптимальным по точности и продолжительности решения является составленный автором алгоритм с 15-тью коэффициентами фильтра Е.Ш.Абрамовой [2]. Для расчета функции $R(m)$ автором принято соответствующее решение из программы Гхоша. Этот комбинированный алгоритм реализован автором в программе VEZLUC для расчета кривых ρ_k - ВЭЗ град.-зондирования на языке Фортран Power Station в четвертой версии FPS [51].

Расчет многослойных кривых ρ_k п-з (потенциал-зондирования) может быть выполнен в соответствии с формулой (2.1.3) и составленным на Кафедре геофизики Геологического факультета МГУ методом линейной свертки алгоритмом [65], с использованием 20-ти коэффициентов фильтра Е.Ш.Абрамовой для потенциал-установки ВЭЗ

$$\rho_k \text{ п-з} = \rho_1 * \sum_{k=1}^{20} R(k+j-1) * G(k) \quad (2.1.5)$$

где j - порядковый номер в последовательности перемещения линии r электрода М (от 1 до NR). $G(k)$ - 20 коэффициентов фильтра: $G(1) = -0.1099262$; $G(2) = +0.7347261$; $G(3) = -1.381082$; $G(4) = +0.4568852$; $G(5) = +0.0198409$; $G(6) = +0.1071103$; $G(7) = +0.4762410$; $G(8) = +0.07820972$; $G(9) = +0.1514746$; $G(10) = +0.2305232$; $G(11) = -0.08131572$; $G(12) =$

+0.2064898; G(13) = +0.06853591; G(14) = -0.2657292; G(15) = +0.4521222; G(16) = -0.0799535; G(17) = -0.6110877; G(18) = +1.119350; G(19) = -0.8713700; G(20) = +0.2989666. Систему абсцисс функции R(m) в составленной автором программе VEZLU3 определяет принятая последовательность:

по разностям AM : $r(1) = 1.000$; $r(j) = r(j-1) * 1.389$;

по абсциссам функции R(m) : $XRM(1) = r(1) / (1.389 ** 6)$;

$$XRM(i) = XRM(i-1) * 1.389 .$$

Как и в программе VEZLUC расчет функции R(m) в программе VEZLU3 выполнен с использованием соответствующего алгоритма Гхоша. Выполненное автором сопоставление ρ п-з, полученных по программе VEZLU3, с соответствующими величинами ρ п-з, полученными методом зеркальных отражений по программе KGMI при 50000 членах ряда на 21-ом разnose ($X(21) = 715$ м.), показали исключительно высокую точность расчета кривых ρ п-з, с 20-тью коэффициентами фильтра Е.Ш.Абрамовой. Точность вычисления коэффициентов фильтра Е.Ш.Абрамовой для потенциал зондирования (AM) ВЭЗ настолько высокая, что даже при параметрах геоэлектрического разреза: $\rho_1 = 1000$ Омм, $\rho_2 = 1$ Омм, $\rho_3 = 0.001$ Омм; $h_1 = 1$ м., $h_2 = 1$ м. расчетная кривая ρ_k п-з, VEZLU3 оказалась абсолютно безупречной, в то время как кривая ρ_k п-з по KGMI потребовала увеличения количества членов ряда значительно более 50000 (рис. 2.1.1).

Расчет многослойных кривых ρ_k пSk(x) (производной Sk(x)) выполняется на основе выведённой автором формулы (1.2.10)

$$\rho_k nSk(x) = (\rho_k n - z)^2 / \rho_k z - z$$

по программе VEZLUC . Последняя включает в себя расчет и вывод значений ρ_k Г-з, ρ_k П-з и ρ_k пSk(x) . На рис. 2.1.2 приведено совмещение семислойных кривых ρ_k Г-з, ρ_k П-з, ρ_k пSk(x), дающее наглядное представление о взаимном соответствии послыных элементов кривых ρ_k град.-зонд, потенц. -зонд. и производной по Sk(x) .

Кривые ρ_k производные по Sk(x) в равной с кривыми ρ_k град.-зонд. и ρ_k потенц.-зонд. мере подвержены влиянию принципа эквивалентности.

Таблица 3.3.1

j	X(j)	N - к-во член. ряда в КГМІ	Параметры разреза: $\rho_i = 1000, 1, 0.001$ Омм; $h_i = 1, 1$ м			
			ρ_k потенциал-зондирования		ρ_k град.-зонд.	ρ_k произв. по $S_k(x)$
			По КГМІ, ме- тодом зерк.отр	По VEZLU3 с 20-тью коэф.	По Абрамовой с 15-тью к.ф	По VEZLUC
1	1.000	300	420.3215	401.236	844.311	190.676
2	1.389	400	256.9661	256.143	684.698	95.822
3	1.929	500	131.0524	129.9867	456.505	37.013
4	2.680	600	48.7566	47.70628	223.904	10.162
5	3.722	750	9.901168	11.453604	70.608	1.85792
6	5.170	900	2.444514	1.607324	12.246	0.21096
7	7.181	1100	1.05304	0.164513	1.1673	0.023189
8	9.975	1400	0.748770	0.105907	0.26885	0.0417132
9	13.85	1800	+0.484078	0.099632	0.16184	0.0613277
10	19.24	2350	-0.2355628	0.072649	0.11376	0.0464087
11	26.73	3100	+0.0698385	0.048935	0.08595	0.0278545
12	37.13	4300	-0.0048111	0.033083	0.06229	0.0175753
13	51.57	5700	-0.00801511	0.022949	0.04398	0.0119745
14	71.64	9000	+0.0005388	0.016323	0.03107	0.00857466
15	99.50	13000	+0.0010028	0.011842	0.0221	0.00637331
16	138.2	19000	0.001000115	0.008743	0.01609	0.00474149
17	192.0	24500	0.001000052	0.006540	0.01178	0.00363082
18	266.7	33000	0.001000028	0.004978	0.00873	0.00283719
19	370.4	40000	0.001000015	0.003860	0.00656	0.00227220
20	514.4	45000	0.0010000076	0.003057	0.00500	0.00187153
21	714.6	50000	0.0010000040	0.002480	0.00388	0.00139046
22	992.4			0.002066	0.00306	0.00125434
23	1379.			0.001767	0.00249	0.00116316
24	1915.			0.001552	0.00207	
25	2660.			0.001398		
26	3695.			0.001286		

```

PROGRAM VEZLUC      !      KOEF. FOR J0
  REAL X(24),H(9),XRM(60),XRM2(60)
  REAL(8) G(15),B,RO(10),REST(24),XM,RW,DW,TH,R(60),S
  REAL(8) GP(20),RESP(24),R2(60),B2,XM2,RW2,DW2,TH2,S1
  REAL(8) RKPG(24)
  INTEGER NS,NR,NXM,NXM2
  ! NS - KOLICESTVO SLOEV
  ! NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
  ! PRINT*,'VVEDITE REG'
  PRINT*,'VVEDITE NS'      ! NS - KOL-VO SLOEV
  READ*,NS
  PRINT*,'VVEDITE RO(I)'  ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
  READ*,(RO(I),I=1,NS)
  PRINT*,'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
  READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
  PRINT*,'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV

  READ*,NR
656  X(1)=1.0
      Q=1.389
      DO 703 I=2,NR
          X(I)=X(I-1)*Q
703  CONTINUE
      ! RASCET KRIV RK PO CHOCH AND ABRAMOVYI
      G(1)=-0.01629496D0
      G(2)=0.2038275D0
      G(3)=-1.202593D0
      G(4)=3.737868D0
      G(5)=-5.241852D0
      G(6)=1.916952D0
      G(7)=-0.2248076D0
      G(8)=1.582989D0
      G(9)=-0.1626857D0
      G(10)=0.3619513D0
      G(11)=0.026421D0
      G(12)=-0.0300287D0
      G(13)=0.0676876D0
      G(14)=-0.03006569D0
      G(15)=0.0106298D0
      NXM=NR+14
      XRM(1)=1.*(0.1/(1.389*1.389))
      DO 32 J=2,NXM
          XRM(J)=XRM(J-1)*1.389
32  CONTINUE
      DO 3 J=1,NXM
          B=RO(NS)
          XM=XRM(J)
          DO 22 K=1,NS-1
              K1=K-1
              RW=RO(NS-K)
              DW=H((NS-1)-K1)
              TH=DTANH(DW/XM)
              B=(B+TH*RW)/(1.D0+TH*B/RW)
22  CONTINUE
          R(J)=B
3  CONTINUE
  PRINT*,'VIVOD R(J)'
  PRINT 712,(R(J),J=1,18)
712  FORMAT(5X, ' R( )=' ,E16.10)
      PAUSE
      PRINT 712,(R(J),J=19,NXM)
      PAUSE
      DO 5 J=1,NR
          S=0.D0
          DO 6 I=1,15
              S=S+G(I)*R(I+J-1)
6  CONTINUE
          REST(J)=S
5  CONTINUE

```

```

PRINT*, 'VIVOD X(I)'
PRINT 707, (X(I), I=1, NR)
707 FORMAT(5X, 'X( )=', F8.4)
PAUSE
PRINT*, 'VIVOD REST(I)'
PRINT 705, (REST(I), I=1, 18)
705 FORMAT(5X, 'REST( )=', E16.10)
PAUSE
PRINT 714, (REST(I), I=19, NR)
714 FORMAT(5X, 'REST( )=', E16.10)
PAUSE
! RASCET RK POTENC.-ZOND
GP(1)=-0.1099262
GP(2)=+0.7347261
GP(3)=-1.381082
GP(4)=+0.4568852
GP(5)=+0.0198409
GP(6)=+0.1071103
GP(7)=+0.4762410
GP(8)=+0.07820972
GP(9)=+0.1514746
GP(10)=+0.2305232
GP(11)=-0.08131572
GP(12)=+0.2064889
GP(13)=+0.06853591
GP(14)=-0.2657297
GP(15)=+0.4521222
GP(16)=-0.0799535
GP(17)=-0.6110887
GP(18)=+1.11935
GP(19)=-0.8713700
GP(20)=+0.2989666
NXM2=NR+20
M=6
XRM2(1)=1./(1.389**M)
DO 42 J=2, NXM2
XRM2(J)=XRM2(J-1)*1.389
42 CONTINUE
DO 43 J=1, NXM2
B2=RO(NS)
XM2=XRM2(J)
DO 48 K=1, NS-1
K12=K-1
RW2=RO(NS-K)
DW2=H((NS-1)-K12)
TH2=DTANH(DW2/XM2)
B2=(B2+TH2*RW2)/(1.D0+TH2*B2/RW2)
48 CONTINUE
R2(J)=B2
43 CONTINUE
DO 45 J=1, NR
S1=0.D0
DO 46 I=1, 20
S1=S1+GP(I)*R2(I+J-1)
46 CONTINUE
RESP(J)=S1
45 CONTINUE
PRINT*, 'VIVOD RESP(J)'
PRINT 715, (RESP(J), J=1, 18)
715 FORMAT(5X, 'RESP( )=', E16.10)
PAUSE
PRINT 716, (RESP(J), J=19, NR)
716 FORMAT(5X, 'RESP( )=', E16.10)
PAUSE
! RASCET RK PROIZVODNOYI PO G*
DO 49 J=1, NR
RKPG(J)=RESP(J)*RESP(J)/REST(J)
49 CONTINUE
PRINT*, 'VIVOD RKPG(J)'

```

```

        PRINT 717,(RKPG(J),J=1,18)
717   FORMAT(5X, ' RKPG(      )=',E16.10)
      PAUSE
        PRINT 717,(RKPG(J),J=19,NR)
      PAUSE
      STOP
      END

```

```

PROGRAM VEZLU3      ! TEXT3.FOR
REAL X(24),H(9)
REAL(8) R(60),XRM(60)
REAL(8) REST(24),RO(10),B,XM,RW,DW,TH,S,RES0(24)
REAL(8) G(20)
INTEGER NS,NR,NXM
!   N - KOLICESTVO SLOEV
!       NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
!               !   PRINT*,'VVEDITE REG'
!   READ*,REG
!   REG = 1   RASCET DIAGON. MATRIZI
!   REG = 2   RASCET PO SEKZIONNIY MATRIZI
PRINT*,'VVEDITE NS'      ! N - KOL-VO SLOEV
READ*,NS
PRINT*,'VVEDITE RO(I)'  ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
READ*,(RO(I),I=1,NS)
PRINT*,'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
PRINT*,'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV
READ*,NR
656  X(1)=1.0
      Q=1.389
      DO 703 I=2,NR
        X(I)=X(I-1)*Q
703  CONTINUE
      CALL KGMI(NS,NR,H,RO,X,REST)
      PRINT*,'VIVOD X(I)'
      PRINT 707,(X(I),I=1,NR)
707  FORMAT(5X, ' X(      )=',F8.4)
      PAUSE
      PRINT*,'VIVOD REST(I)'
      PRINT 705,(REST(I),I=1,NR)
705  FORMAT(5X, ' REST(      )=',E16.10)
      PAUSE
      G(1)=-0.1099262
      G(2)=+0.7347261
      G(3)=-1.381082
      G(4)=+0.4568852
      G(5)=+0.0198409
      G(6)=+0.1071103
      G(7)=+0.4762410
      G(8)=+0.07820972
      G(9)=+0.1514746
      G(10)=+0.2305232
      G(11)=-0.08131572
      G(12)=+0.2064889
      G(13)=+0.06853591
      G(14)=-0.2657297
      G(15)=+0.4521222
      G(16)=-0.0799535
      G(17)=-0.6110887
      G(18)=+1.119350
      G(19)=-0.8713700
      G(20)=+0.2989666
      NXM=NR+20
      M=6
      XRM(1)=1./(1.389**M)      !=0.13924
      DO 32 J=2,NXM

```

```

XRM(J)=XRM(J-1)*1.389
32 CONTINUE
DO 3 J=1,NXM
  B=RO(NS)
  XM=XRM(J)
  DO 8 K=1,NS-1
    K1=K-1
    RW=RO(NS-K)
    DW=H((NS-1)-K1)
    TH=DTANH(DW/XM)
    B=(B+TH*RW)/(1.D0+TH*B/RW)
8 CONTINUE
  R(J)=B
3 CONTINUE
  DO 5 J=1,NR
    S=0.D0
    DO 6 I=1,20
      S=S+G(I)*R(I+J-1)
6 CONTINUE
    RES0(J)=S
5 CONTINUE
    PRINT*, 'VIVOD RES0(J)'
    PRINT 712, (RES0(J), J=1, 18)
712 FORMAT(5X, ' RES0( )=', E16.11)
    PAUSE
    PRINT*, 'VIVOD RES0(J)'
    PRINT 713, (RES0(J), J=19, NR)
713 FORMAT(5X, ' RES0( )=', E16.11)
    PAUSE
    STOP
    END
    SUBROUTINE KGMI(NN, NS, H, RO, X, REST)
    REAL H(2), X(24), CI
    REAL(8) K12, K23, SNJ, B(290000), S(290000), SR, SRA, Z, F
    INTEGER NN, NS, N(30), NU
    REAL(8) REST(24), RO(3)
      ! NN - KOL-VO SLOEV
      ! NS - KOL-VO RAZNOSOV
    RO1=RO(1)
    RO2=RO(2)
    RO3=RO(3)
    H1=H(1)
    H2=H(2)
    N(1)=300
    N(2)=400
    N(3)=500
    N(4)=600
    N(5)=750
    N(6)=900
    N(7)=1100
    N(8)=1400
    N(9)=1800
    N(10)=2350
    N(11)=3100
    N(12)=4300
    N(13)=5700
    N(14)=9000
    N(15)=13000
    N(16)=19000
    N(17)=24500
    N(18)=33000
    N(19)=40000
    N(20)=45000
    N(21)=50000
    NN=3
    K12=(RO2-RO1)/(RO2+RO1)
    K23=(RO3-RO2)/(RO3+RO2)
    DO 11 J=1, NS
      RJ=X(J)

```

```

      NJ=N(J)
      F=H(2)/H(1)
      NU=F
      I=1
      B(1)=K12
      SR=RJ/DSQRT(RJ*RJ+4.D0)
      S(1)=K12*SR
      DO 12 I=2,NJ
      IF(I.GT.1.AND.I.LT.(NU+1)) GOTO 7
      IF(I.EQ.(NU+1)) GOTO 8
      IF(I.GT.(NU+1)) GOTO 9
7     B(I)=K12*B(I-1)
      GOTO 10
8     B(I)=K12*B(I-1)-K12*K23*B(1)+K23
      GOTO 10
9     B(I)=K12*B(I-1)+K23*B(I-NU-1)-K12*K23*B(I-NU)
10    CI=I
      SRA=RJ/DSQRT(RJ*RJ+4.D0)*CI*CI
      Z=SRA
      S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
12    CONTINUE
      SNJ=S(NJ)
      REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
11    CONTINUE
21    CONTINUE
      RETURN
      END

```

2.2. О дифференциальных и интегральных трансформациях кривых ρ_k ВЭЗ (град.-зонд.)

Для снижения влияния принципа эквивалентности многими исследователями предлагается получать:

- 1) трансформированные кривые кажущихся сопротивлений по проводимости [6, 7]

$$S_k(x) = r / \rho_k, \text{ где } r - \text{разнос установки } AMNB / 2;$$

- 2) трансформированные кривые кажущихся сопротивлений по сопротивлению [7]

$$T = r * \rho_k;$$

- 3) производные трансформированные кривые [48,63] :

$$\rho_T = \partial T_k / \partial r = \rho_k + r * (\partial \rho_k / \partial r); \quad (2.2.1)$$

$$\rho_S = r / S_k = \rho_k^2 / [\rho_k + r * (\rho_k / r)] \quad (2.2.2)$$

и их обобщённой функции $\rho_m = \sqrt{\rho_T * \rho_S}$.

Полученные разрезы трансформированных кажущихся сопротивлений, с их привязкой по оси абсцисс к эффективным глубинам $h_{эф}$ оказывают существенную помощь на этапе качественной интерпретации кривых ρ_k - ВЭЗ.

В работе [48] на примере электроразведочных работ ВЭЗ в Ханойской депрессии рассмотрена эффективность внедрения интерпретации кривых ВЭЗ с расчетом теоретических дифференциально-трансформированных кривых сопротивлений по программе, разработанной А.Г.Яковлевым на основе коэффициентов фильтра Е.Ш.Абрамовой. Для каждой точки на кривой ВЭЗ в процессе вычислений были приняты :

$$r = [r(j+1) + r(j)] / 2; \rho_k = [\rho_k(j+1) + \rho_k(j)] / 2; \Delta\rho = \rho_k(j+1) - \rho_k(j); \Delta r = r(j+1) - r(j);$$

$$\rho_s = [r(j+1) - r(j)] / \{[r(j+1) / \rho_k(j+1)] - [r(j) / \rho_k(j)]\};$$

$$\rho_t = \{[r(j+1) * \rho_k(j+1)] - [r(j) * \rho_k(j)]\} / [r(j+1) - r(j)].$$

Результаты вычислений приведены на рис. 2.2.1. Здесь же, на рис. 2.2.1, приведены полученные автором расчетные (по снятым с рис. 2.2.1 параметрам геоэлектрического разреза) кривые ВЭЗ-ИЛРП. Расчет кривых ВЭЗ-ИЛРП выполнен по составленной автором программе VEZLUC (табл. 2.2.1). Хорошее совмещение кривой ρ_k г-з по ВЭЗ-ИЛРП с кривой ρ_k из работы [483] подтверждает правильность определения геоэлектрических параметров по рис. 2.2.1. Рис.2.2.1 наглядно подтверждает высказанное выше мнение, что по асимптоте кривой ρ_k пSk(x) можно увереннее, чем по кривым ρ_k г-з, ρ_k п-з или ρ_k из работы [69], определять удельное сопротивление последнего слоя.

Дополнительную информацию о разрезе можно получить на основе использования интегральных трансформаций [63]

$$S_{\sum T_p} = \int_{r_{\min}}^{r^+} dr / \rho_k \quad \text{и} \quad T_{\sum T_p} = \int_{r_{\min}}^{r^+} \rho_k * dr ,$$

где r_{\min} - минимальный разнос на кривой, r^+ - некоторый оптимальный разнос, например АВ/2. Интегральные характеристики рекомендуется [63] получать с помощью ЭВМ в ходе первичной обработки полевых материалов.

Таблица 2.2.1 расчета кривых ВЭЗ-ИЛРП по программе VEZLUC по Ханойской депрессии

j	X(j)	Параметры: $\rho_i = 40; 150; 50; 20; 500$ Омм		
		$h_i = 5.1; 16.9; 72; 156$ м		
		ρ_k Г-з	ρ_k П-з	ρ_k ПСк(x)
1	1.000	40.05	44.62	49.72
2	1.389	40.12	46.50	53.90
3	1.929	40.32	49.06	59.71
4	2.680	40.81	52.42	67.33
5	3.722	42.01	56.84	76.91
6	5.170	44.66	62.33	87.00
7	7.181	49.78	68.50	94.23
8	9.975	58.04	74.53	95.72
9	13.85	68.76	79.21	91.26
10	19.24	79.91	81.37	82.87
11	26.73	88.70	80.35	72.79
12	37.13	92.09	76.39	63.37
13	51.57	88.03	70.88	57.06
14	71.64	77.35	66.06	56.41
15	99.50	63.80	64.20	64.60
16	138.2	51.32	66.79	86.92
17	192.0	42.05	74.66	132.57
18	266.7	37.72	88.37	207.05
19	370.4	40.33	107.87	288.51
20	514.4	50.35	132.52	348.77
21	714.6	66.60	161.66	392.41
22	992.4	88.29	194.80	429.80

2. 3. Расчет многослойных кривых ВЭЗ-ВП (ИЛРП)

Полная аналогия измерений ВЭЗ-ВП (ИЛРП) с измерениями ВЭЗ-ИЛРП упрощает расчёт кривых η_k градиент-зондирования, потенциал-зондирования, производных по Ск(x) с использованием 15-ти (для расчёта кривых ρ_k градиент-зондирования) и 20-ти (для расчета кривых ρ_k потенциал-зондирования) коэффициентов фильтра Е.Ш.Абрамовой, обеспечивающих необходимую точность для расчёта любого типа кривой η_k . Счёт кривых η_k выполняется по программе WPLUC, полученной на основе программы VEZLUC расчёта многослойных кривых ВЭЗ-ИЛРП.

```

PROGRAM WPLUC      !      KOEF. FOR J0
REAL X(24),H(9)
REAL(8) RO(10),REST(24)
REAL(8) ETA(10),ROZ(10)
REAL(8) RESP(24)
REAL(8) RKPG(24)
REAL(8) P(19),PZ(19),RESTZ(24),RESPZ(24),RKPGZ(24)
REAL(8) ETARG(24),ETARP(24),ETARS(24)
INTEGER NS,NR
!  NS - KOLICESTVO SLOEV
!      NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
!  PRINT*,'VVEDITE REG'
PRINT*,'VVEDITE NS'      ! NS - KOL-VO SLOEV
READ*,NS
PRINT*,'VVEDITE RO(I)'  ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
READ*,(RO(I),I=1,NS)
PRINT*,'VVDITE ETA(I)'
READ*,(ETA(I),I=1,NS)
PRINT*,'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
PRINT*,'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV
READ*,NR
DO 101 I=1,NS
ROZ(I)=RO(I)/(1.D0-ETA(I)*0.01D0)
101 CONTINUE
656 X(1)=1.0
Q=1.389
DO 703 I=2,NR
X(I)=X(I-1)*Q
703 CONTINUE
NS1=NS+1
NH=NS-1
NP=NS+NH
DO 4551 I=1,NS
P(I)=RO(I)
4551 CONTINUE
DO 4581 I=NS1,NP
P(I)=H(I-NS)
4581 CONTINUE
CALL CARCA(P,NP,NH,REST,RESP,RKPG,NR,NS)
DO 4552 I=1,NS
PZ(I)=ROZ(I)
4552 CONTINUE
DO 4582 I=NS1,NP
PZ(I)=H(I-NS)
4582 CONTINUE
CALL CARCA(PZ,NP,NH,RESTZ,RESPZ,RKPGZ,NR,NS)
DO 42 J=1,NR
ETARG(J)=(RESTZ(J)-REST(J))/RESTZ(J)*100.D0
ETARP(J)=(RESPZ(J)-RESP(J))/RESPZ(J)*100.D0
ETARS(J)=(RKPGZ(J)-RKPG(J))/RKPGZ(J)*100.D0
42 CONTINUE
PRINT*,'VIVOD X(I)'
PRINT 707,(X(I),I=1,NR)
707 FORMAT(5X, 'X( )=',F8.4)
PAUSE
PRINT*,'VIVOD ETARG(I)'
PRINT 705,(ETARG(I),I=1,18)
705 FORMAT(5X, 'ETARG( )=',E16.10)
PAUSE
PRINT 714,( ETARG(I),I=19,NR)
714 FORMAT(5X, 'ETARG( )=',E16.10)
PAUSE
! VIVOD ETARP POTENC.-ZOND
PRINT*,'VIVOD ETARP(J)'
PRINT 715,(ETARP(J),J=1,18)
715 FORMAT(5X, 'ETARSP( )=',E16.10)

```

```

    PAUSE
    PRINT 716,(ETARP(J),J=19,NR)
716  FORMAT(5X, ' ETARP( )=',E16.10)
    PAUSE
    ! VIVJD ETARS PROIZVODNOYI PO G*
    PRINT*, 'VIVOD ETARS(J)'
    PRINT 717,(ETARS(J),J=1,18)
717  FORMAT(5X, ' ETARS( )=',E16.10)
    PAUSE
    PRINT 717,(ETARS(J),J=19,NR)
    PAUSE
STOP
END
SUBROUTINE CARCA(P,NP,NH,REST,RESP,RKPG,NR,NS)
REAL XRM(60),XRM2(60)
REAL(8) G(15),R(60),S,T,HX,T2,A,P(19) ! B,XM,RW,DW,H(9)
REAL(8) GP(20),R2(60),S1,A2,A3,HX2
REAL(8) REST(24),RESP(24),RKPG(24)
INTEGER NS,NR,NXM,NXM2,NP
PAUSE
G(1)=-0.01629496D0
G(2)=0.2038275D0
G(3)=-1.202593D0
G(4)=3.737868D0
G(5)=-5.241852D0
G(6)=1.916952D0
G(7)=-0.2248076D0
G(8)=1.582989D0
G(9)=-0.1626857D0
G(10)=0.3619513D0
G(11)=0.026421D0
G(12)=-0.0300287D0
G(13)=0.0676876D0
G(14)=-0.03006569D0
G(15)=0.0106298D0
NXM=NR+14
XRM(1)=1.*(0.1/(1.389*1.389))
DO 32 J=2,NXM
XRM(J)=XRM(J-1)*1.389
32  CONTINUE
DO 3 J=1,NXM
T=1.D0
XT=1./XRM(J)
DO 22 I=(NS-1),1,-1
HX=P(I+NS)*XT
IF(HX.GT.15.) T=1.D0
IF(HX.GT.15.) GOTO 22
I1=I+1
A=P(I1)/P(I)*T
A1=(A-1.D0)/(A+1.D0)*EXP(-2.D0*HX)
T=(1.D0+A1)/(1.D0-A1)
22  CONTINUE
R(J)=T
3  CONTINUE
R0=P(1)
DO 5 J=1,NR
S=0.D0
DO 6 I=1,15
S=S+G(I)*R(I+J-1)
6  CONTINUE
REST(J)=S*R0
5  CONTINUE
PAUSE
GP(1)=-0.1099262
GP(2)=+0.7347261
GP(3)=-1.381082
GP(4)=+0.4568852
GP(5)=+0.0198409
GP(6)=+0.1071103

```

```

GP(7)=+0.4762410
GP(8)=+0.07820972
GP(9)=+0.1514746
GP(10)=+0.2305232
GP(11)=-0.0813572
GP(12)=+0.2064889
GP(13)=+0.06853591
GP(14)=-0.2657297
GP(15)=+0.4521222
GP(16)=-0.0799535
GP(17)=-0.6110887
GP(18)=+1.11935
GP(19)=-0.8713700
GP(20)=+0.2989666
NXM2=NR+20
M=6
CM=M
XRM2(1)=1./(1.389**CM)
DO 42 J=2,NXM2
XRM2(J)=XRM2(J-1)*1.389
42 CONTINUE
DO 43 J=1,NXM2
T2=1.D0
XT2=1./XRM2(J)
DO 48 I=(NS-1),1,-1
HX2=P(I+NS)*XT2
IF(HX2.GT.15.) T2=1.D0
IF(HX2.GT.15.) GOTO 48
I2=I+1
A2=P(I2)/P(I)*T2
A3=(A2-1.D0)/(A2+1.D0)*EXP(-2.D0*HX2)
T2=(1.D0+A3)/(1.D0-A3)
48 CONTINUE
R2(J)=T2
43 CONTINUE
R0=P(1)
DO 45 J=1,NR
S1=0.D0
DO 46 I=1,20
S1=S1+GP(I)*R2(I+J-1)
46 CONTINUE
RESP(J)=S1*R0
45 CONTINUE
DO 49 J=1,NR
RKPG(J)=RESP(J)*RESP(J)/REST(J)
49 CONTINUE
51 CONTINUE
RETURN
END

```

Глава 3. Об изучении наклонных – трёхмерных сред методом ВЭЗ

3.1. Обзор работ по изучению наклонных - трёхмерных сред методом ВЭЗ

В работе Е.Н.Каленова [23] отмечено, что на практике "вертикальное электрическое зондирование выполняется над средой, имеющей наклонные границы раздела" и "при интерпретации кривых ВЭЗ можно лишь с грубым приближением полагать, что эти границы горизонтальны в каждой точке ВЭЗ".

Расчет потенциала точечного источника постоянного тока и теоретических кривых ρ_k для двухслойной среды, с наклонной границей раздела приведен в работах А.М.Альпина за 1935 [4] и А.Н.Тихонова за 1946 [56] годы.

В работе А.М.Альпина расчет потенциала от точечного источника рассмотрен для двух предельных соотношений величин удельных сопротивлений геoeлектрического разреза ($K_{12} = 1$ - для случая изолятора под проводящей средой; $K_{12} = -1$ - для идеального проводника под плоской поверхностью раздела). При этом принято, что угол наклона геoeлектрической границы - α может изменяться от горизонтального положения геoeлектрической границы ($\alpha = 0^\circ$) до вертикального ее падения ($\alpha = 90^\circ$). Принято также, что потенциал в каждой точке дневной поверхности по линии наблюдения, перпендикулярной линии пересечения - L горизонтальной плоскости P (дневной поверхности) с S (наклонной плоскостью подошвы исследуемой геoeлектрической среды), определяется суммой потенциалов фиктивных источников . Количество фиктивных источников m определяется в зависимости от угла наклона

$$m = 180^\circ / \alpha . \quad (3.1.1)$$

Следовательно, для $\alpha = 90^\circ$ $m = 2$ и для $\alpha = 0^\circ$ $m = \infty$. Определив h как вертикальную глубину от источника тока (электрода A) до горизонтальной (или в общем случае наклонной) геoeлектрической границы А.М.Альпин предложил следующие формулы расчета потенциала для горизонтальной геoeлектрической границы:

а) при изоляторе под проводящей средой

$$\varphi = \frac{I}{2 * \pi * \sigma} * \sum_{K=-\infty}^{K=+\infty} [1 / (x^2 + 4 * k^2 * h^2)^{-1/2}]$$

б) при идеальном проводнике под плоской поверхностью раздела

$$\varphi = \frac{I}{2 * \pi * \sigma} * \sum_{K=-\infty}^{K=+\infty} [(-1)^K / (x^2 + 4 * k^2 * h^2)^{1/2}]$$

Для любых величин $90^\circ > \alpha > 0^\circ$ А.М. Альпин ввел исходную формулу

$$\varphi = \sum_{K=1}^{K=m} \varphi_k = \frac{I}{2 * \pi * \sigma} * \sum_{K=1}^{K=m} (1 / r_x)$$

для системы фиктивных электродов A_k (в однородном пространстве), эквивалентных электроду A_0 (питающему), где r_k - расстояние между фиктивным электродом A_k и точкой, для которой рассчитывается потенциал φ_k .

По А.М.Альпину [4] совокупность фиктивных электродов A_k , размещенных по вершинам правильного m -угольника, с центром в начале координат ($x=R_0$; $y=0$; $z= 0$) располагается симметрично по отношению к плоскости P (в плоскости XOZ). В каждой точке плоскости XOZ элементарному вектору плотности тока i_k фиктивного электрода A_k

соответствует вектор i_k от электрода A_k , зеркального изображения A_k в плоскости P (горизонтальной дневной поверхности). Компоненты этих векторов, перпендикулярных к плоскости P , в сумме дают нуль [4, фиг. 1]. Плоскость S также служит плоскостью зеркальной симметрии электродов A . В каждой точке плоскости S элементарному вектору i_{k+1} соответствует элементарный вектор i_k , являющийся зеркальным изображением вектора i_{k+1} в плоскости S . Все это определено для удовлетворения граничного условия $\partial\varphi / \partial n = 0$ на плоскостях P и S .

В работе [5] А.М.Альпин предложил систему формул для расчета кривых ρ_k - ВЭЗ над двухслойной средой с наклонной границей раздела при любых значениях $90^\circ > \alpha > 0^\circ$ и соотношений ρ_2 / ρ_1 . Рассчитанные на их основе двухслойные кривые ρ_k приложены к альбому трехслойных палеток, изданному Государственным союзным геофизическим трестом [3] и в книге В.Н.Дахнова [14]. В отличие от палеток ВЭЗ группы вычисленных кривых ρ_k названы палетками НЗЛ (наклонное зондирование параллельное линии L). Каждая из палеток НЗЛ содержит группу кривых ρ_k для постоянного угла α ($22^\circ 30'$; 30° ; 45° ; 60°) и переменных отношений ρ_2 / ρ_1 . Кривые зондирования в случае наклонной границы раздела правой ветвью выходят на более низкие значения ρ_k , чем кривые ρ_k над горизонтально-слоистым разрезом. Так при $\rho_2 = \infty$ асимптотой кривой ρ_k уже не является прямая с наклоном 45° , а стремится к некоторому конечному асимптотическому значению, тем меньшему, чем больше угол α [23].

В практике наблюдений методом ВЭЗ разносы симметричной установки рекомендовано располагать перпендикулярно падению границы. В этом случае, не зная углов падения границы и соотношения удельных сопротивлений первой и второй сред двухслойной наклонной среды, при использовании для интерпретации обычных двухслойных палеток ρ_k возможны следующие ошибки [23]:

- 1) при $\alpha = 30^\circ$ по уменьшению глубин h_1 - 20 %;
по сопротивлению ρ_2 - 35 %;
- 2) при $\alpha = 60^\circ$ по уменьшению глубин h_1 - 55 %;
по сопротивлению ρ_2 - 70 %.

Е.Н.Каленовым отмечено, что использование обычных двухслойных палеток по ρ_k допустимо при углах падения до $15 - 25^\circ$, с ошибкой интерпретации не более 10 - 15 %. Е.Н.Каленовым рассмотрены [23] также ожидаемые результаты наблюдений ВЭЗ при ориентации разносов установки АМNB по падению наклонной геоэлектрической границы. На построенных для этого случая палетках НК (наклонный контакт) приведены ожидаемые

отклонения кривых ρ_k с перпендикулярной (т.е. по падению границы) от ρ_k с параллельной (т.е. по простиранию границы), без ограничения применения этой (перпендикулярной) установки в зависимости от углов падения геоэлектрической границы. На рис. 3.1.1. из работы Е.Н.Каленова [23] приведены кривые ρ_k , полученные с трёхэлектродной установкой $AMN(B \rightarrow \infty)$ для случаев $\rho_2 / \rho_1 = \infty$ и $\rho_2 / \rho_1 = 0$ при удалении электрода А от центра зондирования в сторону восстания и в сторону падения плоскости раздела. Отмечено, что даже при малых углах падения кривые ρ_k , вычисленные для обеих направлений при оси абсцисс AO/d (где d - расстояние от центра установки до линии L - пересечения плоскостей P и S), очень заметно отличаются друг от друга. Построенные таким образом кривые, в системе абсцисс AO/d , рекомендуется [23] использовать для оценки величины угла падения - α .

Описанные в [54] работы методом двух составляющих, основанные на использовании множества номограмм для определения простирания и угла падения наклонных границ раздела, имели весьма ограниченное применение и только на участках, обеспеченных большим объемом опорного бурения.

В работе [66] отмечено, что в практике исследования геоэлектрического разреза наблюдаемые кривые ρ_k не отличаются от теоретических для горизонтально-слоистых сред, если угол падения слоя не превышает 10° . В продолжение к этому в [63] геоэлектрические разрезы, с углами падения до 10° и "не резко меняющимся сопротивлением слоев по простиранию", рекомендуется изучать с помощью дивергентных ($AMONB$) и азимутально-радиальных ($ABM_{аз}N_{аз}$) дипольных установок. При этом по результатам наблюдений наряду с ρ_k получают трансформированные кривые ρ_s и ρ_t .

В настоящее время все большее распространение в практике интерпретации кривых ВЭЗ, полученных над клиновидными средами, находит моделирование, основанное на методах интегральных преобразований [62].

3.2. О преимуществах наблюдений ВЭЗ-ИЛРП с трёх-электродной установкой А-пост. $MN(B \rightarrow \infty)$

Как было отмечено в разделе 2.2 трёхэлектродная установка А-пост. $MN(B \rightarrow \infty)$, с неподвижным питающим электродом А, является наименее чувствительной к отклонению реальных геологических условий от идеальных для горизонтально-слоистых сред. Если при размотке обычной установки $ANM(B \rightarrow \infty)$ над наклонной плоскостью двухслойного геоэлектрического разреза, при перемещении электрода А (от неподвижного центра электродов MN) в сторону восстания или падения плоскости раздела, кривые ρ_k приобретают

вид трёхслойных при $\rho_2 > \rho_1$ или явно отклоняются от нормального хода теоретической двухслойной кривой при $\rho_2 < \rho_1$ уже начиная с угла падения пласта в один градус (рис. 3.1.1). То при неподвижном электроде А установки А-пост. MN($B \rightarrow \infty$) ход кривой ρ_k близок к двухслойной теоретической для горизонтально-слоистой модели при углах наклона до 5° .

Проведение наблюдений с установкой А-пост. MN($B \rightarrow \infty$) позволяет построить систему встречных графиков $S_k(x)$; увязать их и составить три варианта кажущихся геоэлектрических разрезов - по U/I ; по $S_k(x)$; по ρ_k п-з; построить геоэлектрические разрезы ρ_k п $S_k(x)$ и ρ_k град.-зонд. с учётом их привязки к точкам отражения. Этот промежуточный этап качественной обработки результатов наблюдений и вычислений позволяет разделить весь непрерывный профиль наблюдений ВЭЗ-ИЛРП на интервалы различной достоверности последующей количественной интерпретации кривых ВЭЗ (ρ_k град.-зонд.; ρ_k потенц.-зонд.; ρ_k производных по $S_k(x)$). Итоговое построение сводных глубинных геоэлектрических разрезов выполняется с привязкой полученных глубин к половине абсциссы соответствующих эквивалентных точек Н, К, А, Q.

Глава 4. Расчёт методом зеркальных (многократных) отражений двухслойных кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при наклонной геоэлектрической границе, наклонном дневном рельефе и горизонтальном градиенте послыонных величин удельных электрических сопротивлений и поляризуемостей

4.1 Расчёт методом зеркальных отражений двухслойных кривых ВЭЗ-ИЛРП при наклонной геоэлектрической границе и горизонтальном рельефе дневной поверхности

Проведение наблюдений с установкой AMN($B \rightarrow \infty$) при неподвижном питающем электроде А позволяет выполнить расчёт графиков $S_k(x)$ и лучевых кривых ρ_k ВЭЗ-ИЛРП для наклонных геоэлектрических границ и наклонного дневного рельефа. В начале решения этой задачи автором выведены формулы для наклонной геоэлектрической границы при горизонтальном рельефе дневной поверхности.

Угол наклона - (φ) геоэлектрической границы определим выражением

$$\sin \varphi = (h_j - h_0) / x(j) \quad (4.1.1)$$

В соответствии с условием равенства углов падения и отражения (α_1):

а) в направлении по падению геоэлектрической границы (рис 4.11):

$$l_1/h_0 = \operatorname{tg} \alpha_1; \quad (4.1.2) \quad l_2/h_j = \operatorname{tg} \alpha_1; \quad (4.1.3) \quad l_2 = x(j) * \cos \varphi - l_1 \quad (4.1.4)$$

$$h_j = h_0 + x(j) * \sin \varphi; \quad (4.1.5) \quad \frac{l_1}{h_0} = \frac{x(j) * \cos \varphi - l_1}{h_0 + x(j) * \sin \varphi}; \quad (4.1.6) \quad l_1 = \frac{h_0 * x(j) * \cos \varphi}{2 * h_0 + x(j) * \sin \varphi}; \quad (4.1.7)$$

$$l_2 = x(j) * \cos \varphi * \left[1 - \frac{h_0}{2 * h_0 + x(j) * \sin \varphi} \right]; \quad (4.1.8)$$

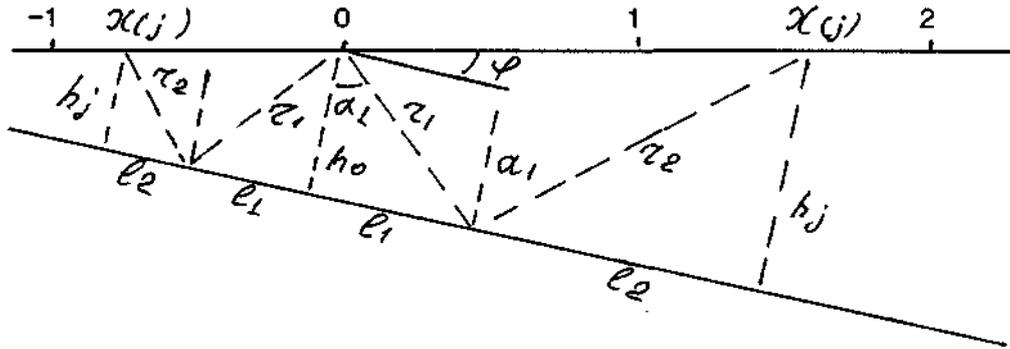


Рис. 4.1.1 Ход лучей при N = 1

б) в направлении по восстанию геозэлектрической границы из условия

$$l_1 / h_0 = l_2 / h_j \text{ и равенств}$$

$$h_j = h_0 - x(j) * \sin \varphi \quad (4.1.9) \quad l_2 = x(j) * \cos \varphi - l_1$$

$$\frac{l_1}{h_0} = \frac{x(j) * \cos \varphi - l_1}{h_0 - x(j) * \sin \varphi} \quad (4.1.10) \quad l_1 = \frac{h_0 * x(j) * \cos \varphi}{2 * h_0 - x(j) * \sin \varphi} \quad (4.1.11)$$

$$l_2 = x(j) * \cos \varphi * \left[1 - \frac{h_0}{2 * h_0 - x(j) * \sin \varphi} \right] \quad (4.1.12)$$

Откуда

$$r_1 = \sqrt{h_0^2 + l_1^2}, \quad (4.1.13)$$

$$r_2 = \sqrt{h_j^2 + l_2^2}, \quad (4.1.14)$$

и соответственно при N = 1 (количестве членов ряда)

$$\frac{U^{N=1}}{I}(x(j)) = \frac{1}{2 * \pi} * \left\{ \frac{1}{x(j)} + \frac{\left\{ \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right\}}{r_1 + r_2} \right\}. \quad (4.1.15)$$

При N = 2 (рис. 4.1.2) и более наблюдается следующий процесс изменения величин углов падения и отражения (α) на границах - геозэлектрической (Г1) и дневной поверхности (Г2):

- 1) при $N = 1$: α_1 -- угол падения и отражения на $\Gamma 1 = \alpha_1 + 0$;
 α_2 -- угол падения и отражения на $\Gamma 2 = \alpha_1 + 1 * \varphi$;
- 2) при $N = 2$: α_3 -- угол падения и отражения на $\Gamma 1 = \alpha_1 + 2 * \varphi$;
 α_4 -- угол падения и отражения на $\Gamma 2 = \alpha_1 + 3 * \varphi$;
- 3) при $N = 3$: α_5 -- угол падения и отражения на $\Gamma 1 = \alpha_1 + 4 * \varphi$;
 α_6 -- угол падения и отражения на $\Gamma 2 = \alpha_1 + 5 * \varphi$;
- 4) при $N = 4$: α_7 -- угол падения и отражения на $\Gamma 1 = \alpha_1 + 6 * \varphi$;
 α_8 -- угол падения и отражения на $\Gamma 2 = \alpha_1 + 7 * \varphi$;
- 5) при $N = 5$: α_9 -- угол падения и отражения на $\Gamma 1 = \alpha_1 + 8 * \varphi$;
 α_{10} -- угол падения и отражения на $\Gamma 2 = \alpha_1 + 9 * \varphi$;

Становится очевидным, что всегда между последним выходом луча на дневную поверхность в точку $x(j)$ после серии многократных отражений угол (γ) между выходящим лучом и нормалью из точки $x(j)$ к геоэлектрической границе

$$\gamma = \alpha_1 + 2 * \varphi * (N - 1), \quad (4.1.16)$$

равному последнему углу отражения от $\Gamma 1$.

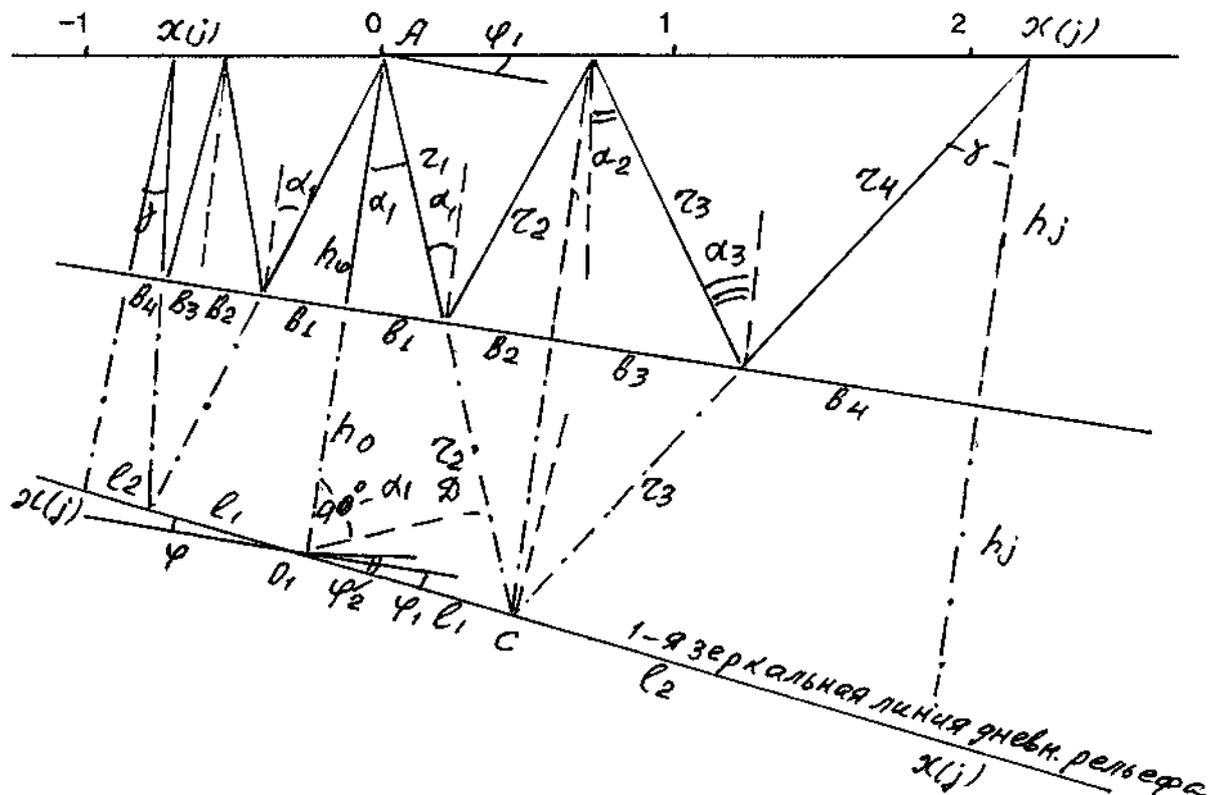


Рис. 4.1.2 Ход лучей при $N=2$

Из равенства (4.1.16) при $\gamma \rightarrow 90^\circ$ и $\alpha_1 \rightarrow 0^\circ$ определим выражение предельного количества членов ряда

$$N\text{-пред.} = \frac{90^0 - \alpha_1}{2 * \varphi} + 1 \quad (4.1.17)$$

и соответственно значения N-пред. = f(φ) :

- | | | |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1) φ=0.5°, N-пред.≤ 91; | 5) φ=4°, N-пред.≤ 12; | 9) φ=10°, N-пред.≤ 5; |
| 2) φ=1°, N-пред.≤ 46; | 6) φ=5°, N-пред.≤ 10; | 10)φ=15°, N-пред.≤ 4; |
| 3) φ=2°, N-пред. ≤ 23; | 7) φ=6°, N-пред.≤ 8; | 11)φ=20°, N-пред.≤ 3; |
| 4) φ=3°, N-пред.≤ 16; | 8) φ=7°, N-пред.≤ 8; | 12)φ=30°, N-пред.≤ 1; |

т.е. при угле наклона геоэлектрической границы более 30° получение отражений и решение поставленной задачи исключено.

По аналогии с выводом формул при N = 1 в соответствии с рис. 4.1.2 для N = 2:

А. В направлении по падению геоэлектрической границы:

$$b_1 = h_0 * \operatorname{tg} \alpha_1; \quad r_1 = h_0 * \cos \alpha_1;$$

$$b_2 = h_0 * \frac{\cos \varphi}{\cos \alpha_1} * \frac{\sin(2 * \alpha_1)}{\cos(\alpha + \varphi)} - h_0 * \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (4.1.18)$$

$$r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1} * \frac{\cos(\alpha_1 - \varphi)}{\cos(\alpha_1 + \varphi)}; \quad (4.1.19)$$

$$b_3 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1} * \frac{\cos(\alpha_1 - \varphi)}{\cos(\alpha_1 + \varphi)} * \frac{\sin(2 * (\alpha_1 + \varphi))}{\cos(\alpha_1 + 2 * \varphi)} - b_2; \quad (4.1.20)$$

$$b_4 = (h_0 + x(j) * \sin \varphi * \operatorname{tg}(\alpha_1 + 2 * \varphi)); \quad (4.1.21)$$

$$b_1 + b_2 + b_3 + b_4 = x(j) * \cos \varphi \quad (4.1.22)$$

Этот подход может быть упрощен с введением 1-ой зеркальной линии дневного рельефа. В этом представлении согласно теоремы синусов и заданных углов в ΔAOC

$$\sphericalangle O_1 = 90^0 + \varphi; \quad \sphericalangle C = 180^0 - \alpha_1 - (90^0 + \varphi) = 90^0 - (\alpha_1 + \varphi),$$

$$AD = 2 * h_0 * \cos \alpha_1, \quad O_1D = 2 * h_0 * \sin \alpha_1, \quad DC = O_1D * \operatorname{tg}(\alpha_1 + \varphi),$$

$$R_1 = AD + DC = r_1 + r_2 = 2 * h_0 * [\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 * \operatorname{tg}(\alpha_1 + \varphi)]; \quad (4.1.23)$$

$$l_1^{N=2} = 2 * h_0 * \frac{\sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \varphi)}; \quad (4.1.24)$$

$$\frac{l_2}{\sin \gamma} = \frac{2 * h_j}{\sin(90^0 - (\alpha_1 + \varphi))}; \quad l_2 = \frac{2 * h_j}{\cos(\alpha_1 + \varphi)} * \sin \gamma.$$

С учетом (4.1.5) и (4.1.16)

$$l_2^{N=2} = \frac{2 * (h_0 - x(j) * \sin \varphi)}{\cos(\alpha_1 + \varphi)} * \sin(\alpha_1 + 2 * \varphi) \quad (4.1.25)$$

Согласно рис. 4.1.2

$$l_1^{N=2} + l_2^{N=2} = x(j)$$

и соответственно

$$2 * h_0 * \frac{\sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \varphi)} + \frac{2 * (h_0 + x(j) * \sin \varphi)}{\cos(\alpha_1 + \varphi)} * \sin(\alpha_1 + 2 * \varphi) = x(j) \quad (4.1.26)$$

Решением (4.1.26) является

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{0.5 * x(j) * \cos \varphi + \sin(2 * \varphi) * (h_0 + x(j) * \sin \varphi)}{h_0 + 0.5 * x(j) * \sin \varphi + \cos(2 * \varphi) * (h_0 + x(j) * \sin \varphi)} \quad (4.1.27)$$

Далее, с учетом (4.1.23), получим:

$$r_1 + r_2 = 2 * h_0 * [\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 * \operatorname{tg}(\alpha_1 + \varphi)] \quad (4.1.28)$$

$$\frac{r_3 + r_4}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \frac{2 * h_j}{\sin(90^\circ - (\alpha_1 + \varphi))}; \quad r_3 + r_4 = \frac{2 * (h_0 + x(j) * \sin \varphi)}{\cos(\alpha_1 + \varphi)}; \quad (4.1.29)$$

и согласно (4.1.27)

$$r_1 + r_2 = 2 * h_0 * \{ \cos(\operatorname{arctg} \alpha_1) + \sin(\operatorname{arctg} \alpha_1) * \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} \alpha_1 + \varphi) \} \quad (4.1.30)$$

$$r_3 + r_4 = \frac{2 * (h_0 + x(j) * \sin \varphi)}{\cos(\operatorname{arctg} \alpha_1 + \varphi)}; \quad (4.1.31.)$$

Откуда при N=2

$$\frac{U^{N=2}}{I}(x(j)) = \frac{\rho_1}{2 * \pi * x(j)} * \left[1 + \frac{\left[\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right]^2 * x(j)}{((r_1 + r_2) + (r_3 + r_4))} \right] \quad (4.1.32)$$

При N>2 последовательно выводим:

при N=3 1-ю зеркальную линию геоэлектрической границы, с углом наклона к дневной поверхности $\varphi_3 = 3 * \varphi_1$;

при N=4 2-ю зеркальную линию дневного рельефа, с углом наклона к дневной поверхности $\varphi_4 = 4 * \varphi_1$

при N=5 2-ю зеркальную линию геоэлектрической границы, с углом наклона к дневной поверхности $\varphi_5=5*\varphi_1$;
при N=6 3-ю зеркальную линию дневного рельефа, с углом наклона к дневной поверхности $\varphi_6=6*\varphi_1$;
и т.д., если соблюдается условие (4.1.17).

По аналогии с рис. 4.1.2 в общем случае для N-го ряда:

$$\text{От } N=1 \quad h_j=h_0+x(j)*\sin\varphi_1$$

До любого N

$$H_2=N*h_0+x(j)*\sin\varphi+x(j)*\cos\varphi*\operatorname{tg}((N-1)*\varphi),$$

$$l_1=N*h_0*\frac{\sin\alpha_1}{\cos(\alpha_1+(N-1)*\varphi)}, \quad (4.1.33)$$

$$l_2=H_2*\frac{\sin(\alpha_1+2*\varphi*(N-1))}{\cos(\alpha_1+\varphi*(N-1))}. \quad (4.1.34)$$

Из условия равенства проекций на линию геоэлектрической границы

$$x(j)*\cos\varphi=(l_1+l_2)*\cos((N-1)*\varphi) \quad (4.1.35)$$

определим при $H_0=N*h_0$ и $B=x(j)*\cos\varphi/\cos((N-1)*\varphi)$

$$H_0*\sin\alpha_1+H_2*\sin(\alpha_1+2*\varphi*(N-1))=B*\cos(\alpha_1+\varphi*(N-1)) \quad (4.1.36)$$

Решением (4.1.36) является

$$\operatorname{tg}\alpha_1=\frac{B*\cos(\varphi*(N-1))-H_2*\sin(2*\varphi*(N-1))}{H_0+H_2*\cos(2*\varphi*(N-1))+B*\sin(\varphi*(N-1))} \quad (4.1.37)$$

Введем согласно рис. 4.1.2 обозначение $R_1=r_1+r_2+\dots+r_N$ и $R_2=r_{N+1}+r_{N+2}+\dots+r_{2*N}$.
Тогда для N-го члена ряда в соответствии с рис. 4.1.2

$$R_1=H_0*\{\cos(\operatorname{atan}(\operatorname{tg}\alpha_2))+\sin(\operatorname{atan}(\operatorname{tg}\alpha_1))*\operatorname{tg}(\operatorname{atan}(\operatorname{tg}\alpha_1)+(N-1)*\varphi)\} \quad (4.1.38)$$

$$R_2=\frac{H_0*\cos((N-1)*\varphi)}{\cos(\operatorname{atan}(\operatorname{tg}\alpha_1)+(N-1)*\varphi)} \quad (4.1.39)$$

и, следовательно, при любом N

$$\frac{U^{[N]}}{I}(x(j))=\frac{\rho_1}{2*\pi*x(j)}*\left[1+\frac{((p_2-p_1)/(p_2+p_1))^N*x(j)}{R_1+R_2}\right] \quad (4.1.40)$$

Угол наклона-φ в программе задается значением h(1) и выражением $\sin\varphi=(h(1)-h(0))/1m$, где h(1) - глубина до геоэлектрической границы по нормали к последней на расстоянии 1 м от источника тока. Таким образом, если расчет ведется по направлению падения геоэлектрической границы, функция $\sin\varphi$ имеет положительный знак, а в направлении по восстанию - отрицательный.

Б. Расчетные формулы для направления по восстанию геоэлектрической границы:

$$\text{Для } N=1 \quad h_j=h_0-x(j)*\sin\varphi; \quad r_1=h_0/\cos\alpha_1; \quad r_2=(h_0-x(j)*\sin\varphi)/\cos\alpha_1.$$

$$\text{Для любого } N: \quad H_2=N*h_0-x(j)*\sin\varphi-x(j)*\cos\varphi*tg((N-1)*\varphi); \quad (4.1.41)$$

$$l_1=H_0*\sin\alpha_1/\cos(\alpha_1-\varphi*(N-1)); \quad (4.1.42)$$

$$l_2=H_2*\sin(\alpha_1-2*\varphi*(N-1))/\cos(\alpha_1-\varphi*(N-1)). \quad (4.1.43)$$

По условию (4.1.35)

$$l_1+l_2=\frac{x(j)*\cos\varphi}{\cos((N-1)*\varphi)}, \quad x(j)*\cos\varphi=(l_1+l_2)*\cos((N-1)*\varphi)$$

$$B=x(j)*\cos\varphi/\cos((N-1)*\varphi)$$

получим

$$\frac{H_0*\sin\alpha_1}{\cos(\alpha_1-\varphi*(N-1))} + \frac{H_2*\sin(\alpha_1-2*\varphi*(N-1))}{\cos(\alpha_1-\varphi*(N-1))} = B. \quad (4.1.44)$$

Решением (4.1.44) является

$$tg\alpha_1 = \frac{B*\cos(\varphi*(N-1)) + H_2*\sin(2*\varphi*(N-1))}{H_0 + H_2*\cos(2*\varphi*(N-1)) - B*\sin(\varphi*(N-1))}. \quad (4.1.45)$$

Далее, подставляя R₁ и R₂, где

$$R_1 = \frac{H_0*\cos((N-1)*\varphi)}{\cos(a\tan(tg\alpha_1) - \varphi*(N-1))}, \quad (4.1.46) \quad R_2 = H_2*\{\cos(\gamma + \sin\gamma*tg(\gamma + (N-1)*\varphi))\},$$

$$R_2 = H_2*\{\cos[atan(tg\alpha_1) + 2*\varphi*(N-1)] + \sin[atan(tg\alpha_1) + 2*\varphi*(N-1)]*tg[atan(tg\alpha_1) - \varphi*(N-1)]\}, \quad (4.1.47)$$

в формулу (4.1.40) найдем искомое $(U/I)_{(x(j))}^{[N]}$.

Описанное решение вошло в составленную автором программу VEZLUA, с

вычислением ρ_k по формуле (4.1. 48) при $\gamma=\alpha_1-2*\varphi*(N-1)$

$$\rho_k=\rho_1*[1+\sum_{m=1}^{n-npe\delta} \frac{K_{12}^n * x(j)}{R_1 + R_2}]. \quad (4.1.48)$$

Полученные автором результаты позволяют отметить [43] , что при исследовании геоэлектрического разреза методом ВЭЗ углы наклона геоэлектрических границ, независимо от глубины их залегания, не должны превышать 5-8 градусов. Аналогичным образом, методом зеркальных отражений, выведены формулы расчета двухслойных кривых ρ_k потенциал-зондирования при наклонном рельефе дневной поверхности и горизонтальной границе и в общем виде для наклонной геоэлектрической границы при наклонном дневном рельефе.

При этом, естественно, более закономерными являются первичные кривые ВЭЗ-ИЛРП - ρ_k потенциал-зондирования . При углах наклона геоэлектрической границы до $8^{\circ}30'$ кривые ρ_k потенциал-зондирования сохраняют вид двухслойных кривых, практически совпадающих с теоретическими двухслойными кривыми ρ_k потенциал-зондирования для горизонтально-слоистого разреза.

На кривых ρ_k градиент-зондирования при углах наклона геоэлектрической границы более 5° проявляются резкие высокие. Примечательно, что при выполнении размотки электродов MN в сторону восстания геоэлектрической границы уже при $\varphi = -2^{\circ}52'$ (для $h_1 = 4$ м) проявляется ложный минимум , который может служить индикатором наклона границы, при условии если с размоткой в сторону наклона границы таковой не наблюдается.

На кривых ρ_k производных по $S_k(x)$ резкие высокие начинают проявляться уже при наклонах геоэлектрической границы 5 и более градусов. Для этого вида кривых (ρ_k п $S_k(x)$) ложный более выраженный (по сравнению с кривыми ρ_k г-з) минимум проявляется уже при размотке электродов MN как по восстанию так и по падению геоэлектрической границы.

Следовательно, в реальных геологических условиях по степени достоверности наблюдений и интерпретации полученных результатов необходимо отдавать предпочтение кривым ρ_k потенциал зондирования. Часто наблюдаемые подтвержденные повторными измерениями резкие высокие на кривых ρ_k г-з (обычных кривых ВЭЗ) могут быть обусловлены отклонениями реальных геологических условий от горизонтально слоистого разреза. Комплексный анализ кривых ρ_k г-з., ρ_k п $S_k(x)$, ρ_k п-з позволят выделить участки слабо наклонных (до пяти градусов) геоэлектрических границ.

4.2. Расчет методом зеркальных отражений двухслойных кривых ВЭЗ-ИЛРП при наклонном рельефе дневной поверхности и горизонтальной геоэлектрической границе

При выдержанном угле наклона дневной поверхности (β) и горизонтальном залегании геоэлектрической границы ($\varphi = 0^\circ$) согласно рис. 4.2.1

$$\operatorname{tg} \beta = (h(j) - h_0) / x(j). \quad (4.2.1)$$

В соответствии с условием равенства углов падения и отражения (α_1):

а) в направлении подъема дневного рельефа:

$$l_1 = h_0 * \operatorname{tg} \alpha_1; \quad (4.2.2) \quad h(j) = h_0 + x(j) * \operatorname{tg} \beta; \quad (4.2.3)$$

$$l_2 = h(j) * \operatorname{tg} \beta_1; \quad (4.2.4)$$

$$l_2 = x(j) - l_1; \quad (4.2.5) \quad l_1 / h_0 = l_2 / h(j);$$

$$l_1 = \frac{h_0 * x(j)}{2 * h_0 + x(j) * \operatorname{tg} \beta}; \quad (4.2.6) \quad l_2 = x(j) * \left[1 - \frac{h_0}{2 * h_0 + x(j) * \operatorname{tg} \beta} \right]; \quad (4.2.7)$$

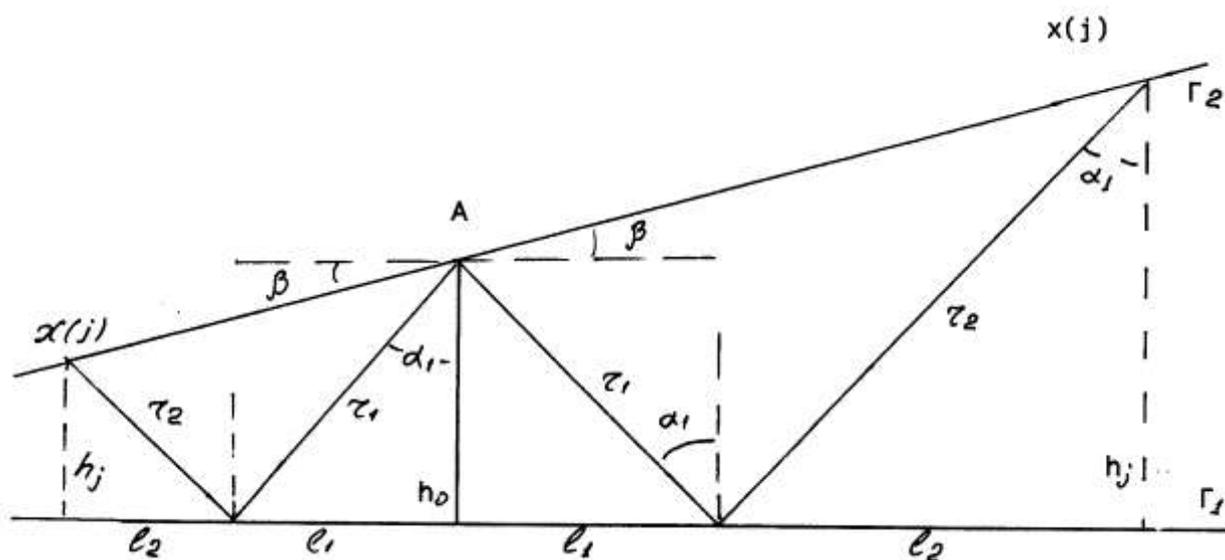


Рис.4.2.1. Ход лучей для $N = 1$ при $\varphi = 0^\circ$

б) в направлении склона дневного рельефа из условия $l_1 / h_0 = l_2 / h(j)$ и равенств (4.2.3) и (4.2.5):

$$\frac{l_1}{h_0} = \frac{x(j) - l_1}{h_0 - x(j) * \operatorname{tg} \beta}; \quad l_1 = \frac{h_0 * x(j)}{2 * h_0 - x(j) * \operatorname{tg} \beta}; \quad (4.2.8)$$

$$l_2 = x(j) * [1 - \frac{h_0}{2 * h_0 - x(j) * tg \beta}] \quad (4.2.9)$$

Для $N = 2$ и более в соответствии с рис. 4.2.2 в направлении подъема дневного рельефа происходит изменение углов падения и отражения (α) на геоэлектрической (Γ_1) и дневной поверхности (Γ_2), аналогичное описанному ранее (между формулами (4.1.15) и (4.1.16)). После серии отражений - N угол γ между последним выходом луча на дневную поверхность в точке $x(j)$ и нормалью из точки $x(j)$ к геоэлектрической границе по аналогии с (4.1.16)

$$\gamma_N = \alpha_{2*N-1} = \alpha_1 + 2 * (N - 1) , \quad (4.2.10)$$

равному последнему углу отражения от Γ_1 . В направлении уклона линии дневного рельефа (Γ_2) от точки А (источника тока) знак приращения угла отражения меняется на обратный, с плюса на минус. Предельное количество членов ряда при $\varphi = 0^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ определяет выражение

$$N\text{-пред} = \frac{90^\circ - \alpha_1}{2 * \beta} + 1 . \quad (4.2.11)$$

При $N \geq 2$, $\varphi = 0^\circ$ и $\beta \neq 0^\circ$ в процесс отражения по аналогии с описанным выше, между (4.1.32) и (4.1.33) последовательно включаются :

- при $N=2$ 1-я зеркальная линия дневной поверхности, с углом наклона к горизонтальной линии $\beta_2 = 1 * \beta_1$;
- при $N=3$ 1-я зеркальная линия геоэлектрической границы, с углом наклона к горизонтальной линии $\beta_3 = 2 * \beta_1$;
- при $N=4$ 2-я зеркальная линия дневной поверхности, с углом наклона к горизонтальной линии $\beta_4 = 3 * \beta_1$;
- при $N=5$ 2-я зеркальная линия геоэлектрической границы, с углом наклона к горизонтальной линии $\beta_5 = 4 * \beta_1$

и далее, если соблюдается условие (4.2.15).

В общем случае для N -го отражения согласно рис. 4.2.2

$$H_0 = h_0 * N ; \quad H_2 = h_0 * N + x(j) * tg \beta + x(j) * tg((N - 1) * \beta) ; \quad (4.2.12)$$

$$l_1 / \sin \alpha_1 = h_0 * N / \cos(\alpha_1 + (N - 1) * \beta) ; \quad l_1 = H * \sin \alpha_1 / \cos(\alpha_1 + (N - 1) * \beta) ; \quad (4.2.13)$$

$$\frac{l_2}{\sin \gamma} = \frac{H_2}{\cos(\gamma - (N - 1) * \beta)} ; \quad l_2 = \frac{H_2 * \sin(\alpha_1 + 2 * \beta * (N - 1))}{\cos(\alpha_1 + \beta * (N - 1))} . \quad (4.2.14)$$

Из условия

$$x(j)/(l_1 + l_2) = \cos((N-1) * \beta) \quad (4.2.15)$$

$$\frac{H_0 * \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + (N-1) * \beta)} + \frac{H_2 * \sin(\alpha_1 + 2 * \beta * (N-1))}{\cos(\alpha_1 + (N-1) * \beta)} = \frac{x(j)}{\cos((N-1) * \beta)} \quad (4.2.16)$$

Принимая $B = x(j) / \cos((N-1) * \beta)$, получим

$$H_0 * \sin(\alpha_1 + 2 * \beta * (N-1)) = B * \cos(\alpha_1 + (N-1) * \beta) \quad (4.2.16a)$$

Равенство (4.2.16a) схоже с (4.1.37), с отличием только в определении B: по (4.1.36)

$B = x(j) * \cos \varphi / \cos((N-1) * \varphi)$. Решением (4.2.16a) принимается (4.1.37), с

переопределением функции B. Далее, для наклонного рельефа при $\varphi = 0^\circ$:

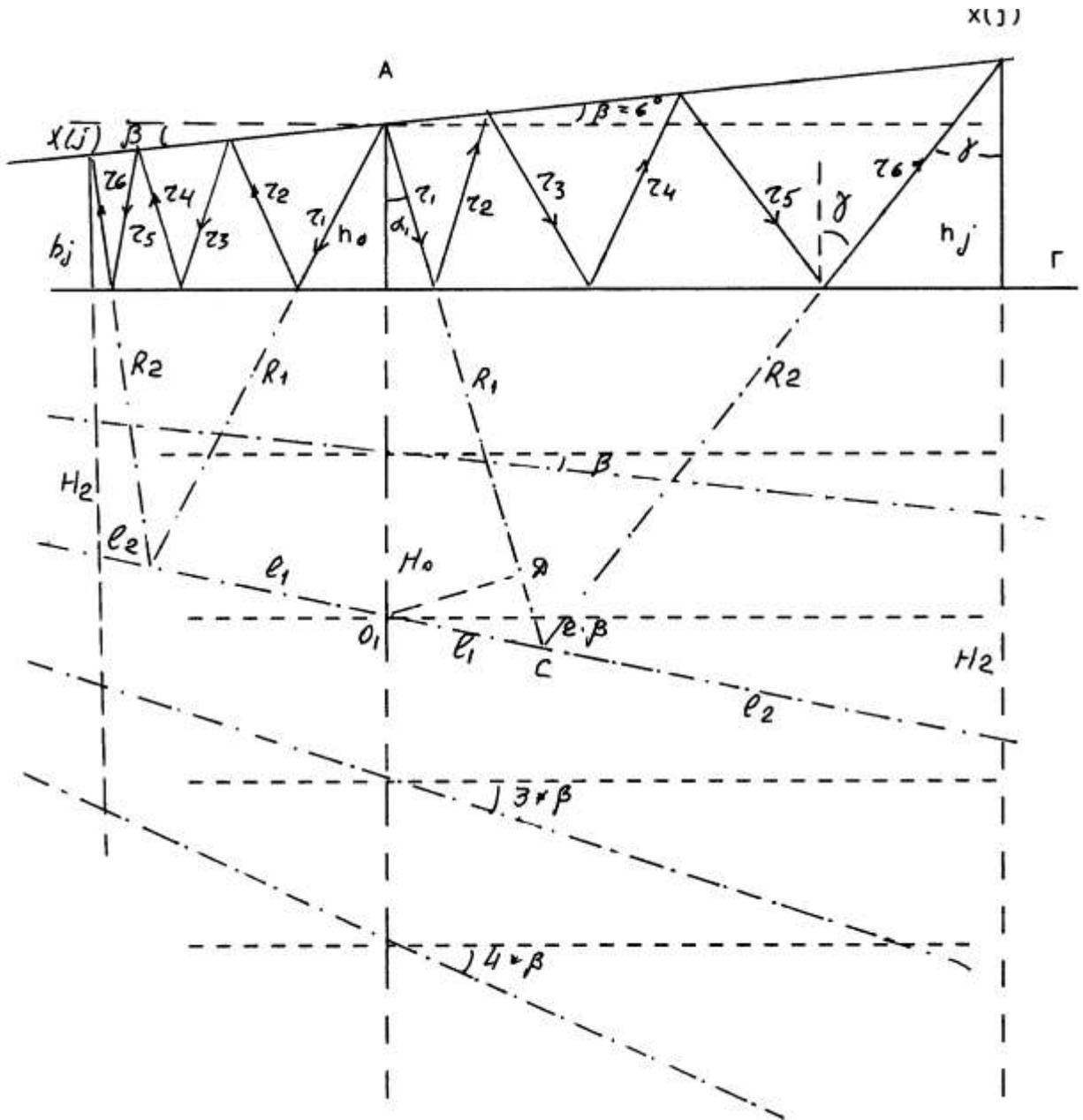


Рис. 4.2.2. Ход лучей при горизонтальной геоэлектрической границе ($\varphi = 0^\circ$) и наклонном дневном рельефе в методе зеркальных отражений.

$$R_1 = H_0 * \{ \cos[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1)] + \sin[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1)] + \operatorname{tg}[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + (N-1) * \beta] \} \quad (4.2.17)$$

$$\frac{R_2}{\cos((N-1) * \beta)} = \frac{H_2}{\cos(\alpha_1 + (N-1) * \beta)} ; \quad R_2 = \frac{H_2 * \cos((N-1) * \beta)}{\cos(a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + (N-1) * \beta)} . \quad (4.2.18)$$

Следовательно, (4.2.17) и (4.2.18) - полный аналог (4.1.38), (4.1.39) и общим решением по определению $(U/I)_{(x(j))}^{[N]}$ принимается (4.1.40).

Для $N=2$ и более в направлении склона дневного рельефа :

$$H_0 = h_0 * N ; \quad H_2 = h_0 * N - x(j) * \operatorname{tg} \beta - x(j) * \operatorname{tg}((N-1) * \beta) ; \quad (4.2.19)$$

$$l_1 = \frac{H_0 * \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 - (N-1) * \beta)} ; \quad (4.2.20)$$

$$l_2 = \frac{H_2 * \sin(\alpha_1 - 2 * \beta * (N-1))}{\cos(\alpha_1 - \beta * (N-1))} \quad (4.2.21)$$

$$\frac{H_0 * \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 - (N-1) * \beta)} + \frac{H_2 * \sin(\alpha_1 - 2 * \beta * (N-1))}{\cos(\alpha_1 - \beta * (N-1))} = \frac{x(j)}{\cos((N-1) * \beta)} . \quad (4.2.22)$$

Принимаем $B = x(j) / \cos((N-1) * \beta)$. Тогда

$$H_0 * \sin \alpha_1 + H_2 * \sin(\alpha_1 - 2 * \beta * (N-1)) = B * \cos(\alpha_1 - (N-1) * \beta) . \quad (4.2.23)$$

Равенство (4.2.23) схоже с (4.1.44) и его решением является также (4.1.45), с переопределением функции B .

Значения R_1 и R_2 при $N \geq 2$ для склона рельефа определим так :

$$\frac{R_1}{\sin(90^\circ - (N-1) * \beta)} = \frac{H_0}{\cos(\alpha_1 - \beta * (N-1))} ; \quad R_1 = \frac{H_0 * \cos[(N-1) * \beta]}{\cos(\alpha_1 - \beta * (N-1))} ;$$

$$R_2 = H_2 * \{ \cos \gamma + \sin \gamma * \operatorname{tg}[\gamma + (N-1) * \beta] \}$$

$$R_1 = \frac{H_0 * \cos((N-1) * \beta)}{\cos(a \tan(\operatorname{tg}(\alpha_1) - ((N-1) * \beta))} ; \quad (4.2.24)$$

$$R_2 = H_2 * \{ \cos[a \tan(\operatorname{tg}(\alpha_1) + 2 * \beta * (N-1))] * \sin[a \tan(\operatorname{tg}(\alpha_1) + 2 * \beta * (N-1))] * \operatorname{tg}[a \tan(\operatorname{tg}(\alpha_1) - \beta * (N-1))] \} . \quad (4.2.25)$$

Эти формулы идентичны: (4.2.24)-ая - (4.1.46)-ой; (4.2.25)-ая - (4.1.47)-ой, а расчет ρ_k выполняется по формуле (4.1.48), с переопределением в программе VEZLUA функции B . Это переопределение задается во вводе коэффициентом FINOL:

1.0 - расчет для наклонной геоэлектрической границы ($\varphi \neq 0^\circ$); 0.0 - расчет для наклонного рельефа дневной поверхности при $\varphi = 0^\circ$. При выполнении счета кривой ρ_k в строке оператора BN вводится показатель степени FINOL

$$BN = x(j) * (\text{COSFI}^{**}\text{FINOL}) / \text{COS}((\text{CI}-1.) * \text{FI}) \quad ! \text{CI} = \text{N} .$$

После чего программа становится универсальной, с установленным ограничением по наличию в разрезе геоэлектрических границ с углами наклона φ не более $5^\circ - 8^\circ$ (при $\beta = 0^\circ$) или соответственно при $\beta = 5^\circ - 8^\circ$ (при $\varphi = 0^\circ$). Разница между этими кривыми на множитель $\cos(8^\circ) = 0.9903$ (т.е. на 1%) исключает необходимость дополнительного сравнения кривых ρ_k потенц.-зонд. с равными углами при φ (при $\beta = 0^\circ$) или β (при $\varphi = 0^\circ$).

4.3. Расчет методом зеркальных отражений двухслойных кривых ρ_k потенц.-зонд. при наклонной геоэлектрической границе и наклонном дневном рельефе

При монотонно наклонных дневном рельефе (β) и геоэлектрической границы (φ) согласно рис. 4.3.1 при $N = 1$ определим:

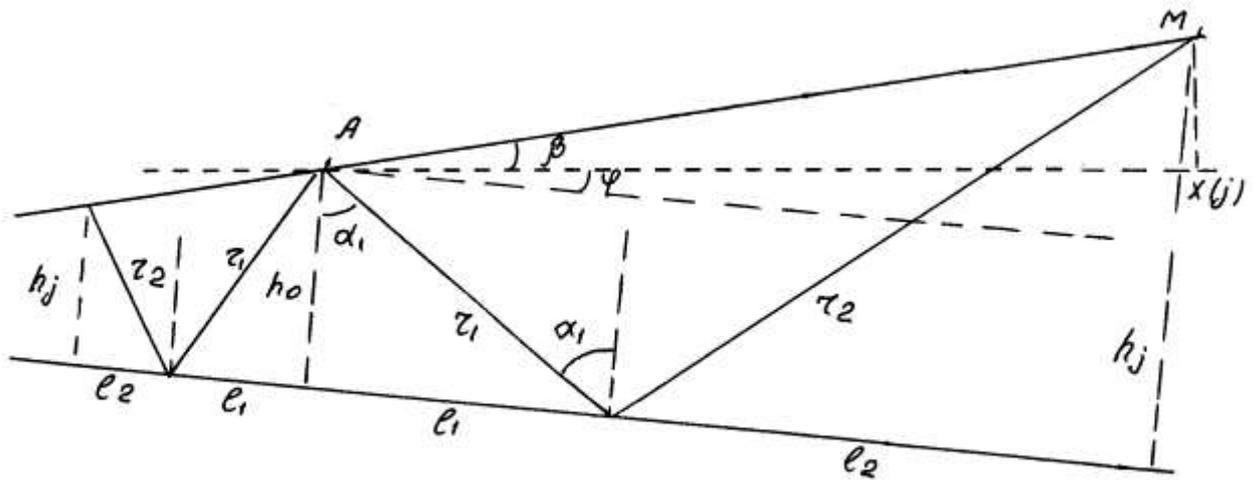


Рис. 4.3.1. Ход лучей при наклонной геоэлектрической границе и наклонном дневном рельефе для $N=1$.

а) в направлении по падению геоэлектрической границы и подъему рельефа (β):

$$x(j)/l_{AM} = \cos \beta ; \quad l_{AM} = x(j) / \cos \beta ; \quad (4.3.1)$$

$$\frac{l_1 + l_2}{l_{AM}} = \cos(\varphi + \beta) ; \quad l_1 + l_2 = \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) . \quad (4.3.2)$$

$$\frac{l_1}{h_0} = \frac{l_2}{h_j} = \operatorname{tg} \alpha_1 ; \quad l_1 = h_0 * \operatorname{tg} \alpha_1 ;$$

$$h_j = h_0 + l_{AM} * \sin(\beta + \varphi) ; \quad h_j = h_0 + \frac{x(j)}{\cos \beta} * \sin(\varphi + \beta) . \quad (4.3.3)$$

С учетом (4.3.2)

$$l_2 = \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) \quad l_1$$

и соответственно

$$\frac{l_1}{h_0} = \frac{(x(j)/\cos \beta) * \cos(\varphi + \beta) - l_1}{h_0 + (x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)} ,$$

$$l_1 = \frac{h_0 * [(x(j)/\cos \beta) * \cos(\varphi + \beta)]}{2 * h_0 + [(x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)]} , \quad (4.3.4)$$

$$l_2 = \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) - \frac{h_0 * [(x(j)/\cos \beta) * \cos(\varphi + \beta)]}{2 * h_0 + [(x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)]} ; \quad (4.3.5)$$

б) в направлении по восстанию геоэлектрической границы и склону рельефа дневной поверхности формулы (4.3.1), (4.3.2) остаются справедливыми. Изменим

$$h_j = h_0 - l_{AM} * \sin(\beta + \varphi) , \quad h_j = h_0 - (x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta) . \quad (4.3.6)$$

Тогда из

$$\frac{l_1}{h_0} = \frac{(x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta) - l_1}{h_0 - (x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)} ; \quad l_1 = \frac{h_0 * (x(j)/\cos \beta) * \cos(\varphi + \beta)}{2 * h_0 - (x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)} , \quad (4.3.7)$$

$$l_2 = \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) - \frac{h_0 * (x(j)/\cos \beta) * \cos(\varphi + \beta)}{2 * h_0 - (x(j)/\cos \beta) * \sin(\varphi + \beta)} . \quad (4.3.8)$$

Откуда

$$r_1 = \sqrt{h_0^2 + l_1^2} ; \quad r_2 = \sqrt{h_j^2 + l_2^2} .$$

Подставим выражения r_1 и r_2 в формулу (4.1.15) и получим искомое $\left(\frac{U}{I}\right)_{(x(j))}^{[N]}$ при $N = 1$.

В общем случае для N -го отражения согласно рис. 4.3.2 наблюдается следующий процесс изменения величин углов падения и отражения (α_1) на границах геоэлектрической (Γ_1) и дневной поверхности (Γ_2):

1) при $N = 1$ α_1 - угол падения и отражения на $\Gamma_1 = \alpha_1 + 0$;

α_2 - угол падения и отражения на $\Gamma_2 = \alpha_1 + (\beta + \varphi)$;

2) при $N = 2$ α_3 - угол падения и отражения на $\Gamma_1 = \alpha_1 + 2 * (\beta + \varphi)$;

α_4 - угол падения и отражения на $\Gamma_2 = \alpha_1 + 3 * (\beta + \varphi)$;

3) при $N = 3$ α_5 - угол падения и отражения на $\Gamma_1 = \alpha_1 + 4 * (\beta + \varphi)$;

α_6 - угол падения и отражения на $\Gamma_2 = \alpha_1 + 5 * (\beta + \varphi)$;

Таким образом, угол (γ) между выходящим лучом и нормалью к геоэлектрической границе

$$\gamma = \alpha_1 + 2*(N-1)*(\beta + \varphi) \quad (4.3.9)$$

равен последнему углу отражения от Γ_1 .

Из равенства (4.3.9) при $\gamma \rightarrow 90^\circ$ и $\alpha_1 \rightarrow 0^\circ$ предельное количество членов ряда определит выражение

$$N - \text{пред.}[\text{при } \beta + \varphi] = \frac{90^\circ - \alpha_1}{2*(\beta + \varphi)} + 1, \quad (4.3.10)$$

а значения $N\text{-пред.} = f(\beta + \varphi)$ будут такими же как и приведенные ранее для $N\text{-пред.} = f(\varphi)$, между формулами (4.1.17) и (4.1.18) .

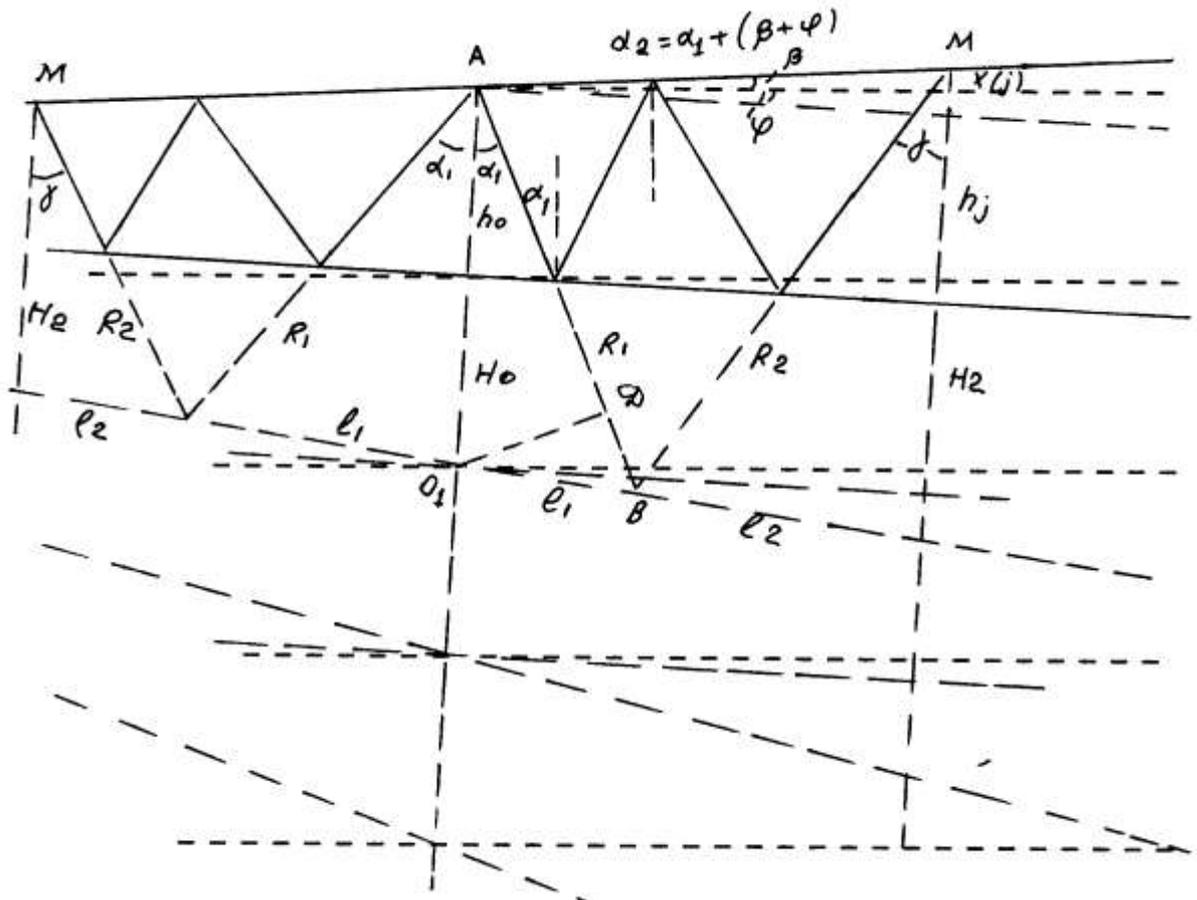


Рис. 4.3.2. Ход лучей при наклонной геоэлектрической границе и наклонном дневном рельефе в методе зеркальных отражений при $N > 1$.

В соответствии с рис. 4.3.2 в общем случае для N-го отражения:

$$H_0 = N * h_0 ;$$

$$H_2 = N * h_0 + \frac{x(j)}{\cos \beta} * \sin(\varphi + \beta) + \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) * \operatorname{tg}[(N - 1) * (\beta + \varphi)] .$$

Из явных отношений

$$\frac{l_1}{\sin \alpha_1} = \frac{H_0}{\sin\{180^\circ - \alpha_1 - [90^\circ + (N - 1) * (\beta + \varphi)]\}} , \quad (4.3.11)$$

$$\frac{l_2}{\sin \gamma} = \frac{H_2}{\sin\{180^\circ - \gamma - [90^\circ + (N - 1) * (\beta + \varphi)]\}} , \quad (4.3.12)$$

получим :

$$l_1 = \frac{H_0 * \sin \alpha_1}{\cos[\alpha_1 + (N - 1) * (\beta + \varphi)]} ; \quad (4.2.13) \quad l_2 = \frac{H_2 * \sin \gamma}{\cos[\gamma + (N - 1) * (\beta + \varphi)]}$$

$$l_2 = \frac{H_2 * \sin[\alpha_1 + 2 * (N - 1) * (\beta + \varphi)]}{\cos[\alpha_1 + (N - 1) * (\beta + \varphi)]} . \quad (4.3.14)$$

Из условия равенства проекций на линию геоэлектрической границы :

$$\frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\beta + \varphi) = (l_1 + l_2) * \cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)] ; \quad (4.3.15)$$

$$l_1 + l_2 = \left[\frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\varphi + \beta) \right] / \cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]$$

определим при $H_0 = N * h_0$ и

$$B = \frac{[x(j) / \cos \beta] * \cos(\beta + \varphi)}{\cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]} , \quad (4.3.16)$$

$$H_0 * \sin \alpha_1 + H_2 * \sin[\alpha_1 + 2 * (N - 1) * (\beta + \varphi)] = B * \cos[\alpha_1 + (N - 1) * (\beta + \varphi)] \quad (4.3.17)$$

Выражение (4.3.17) аналогично ранее описанным, с отличием только в определении функции В. Поэтому решением (4.3.17) также принимается (4.1.37), с переопределением функции В. Далее, согласно рис. 4.3.2

$$R_1 = H_0 * \{\cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 * \operatorname{tg}[\alpha_1 + (N - 1) * (\beta + \varphi)]\} \quad (4.3.18)$$

и отношения

$$\frac{R_2}{\cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]} = \frac{H_2}{\cos[\alpha_1 + (N - 1) * (\beta + \varphi)]} , \quad (4.3.19)$$

запишем

$$R_1 = H_0 * \{ \cos[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1)] + \sin[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1)] * \operatorname{tg}[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + (N - 1) * (\beta + \varphi)] \} , \quad (4.3.20)$$

$$R_2 = \frac{H_2 * \cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]}{\cos[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + (N - 1) * (\beta + \varphi)]} . \quad (4.3.21)$$

Выражения (4.3.20), (4.3.21) аналогичны (4.1.38), (4.1.39), (4.2.17), (4.1.18), и расчет $\left(\frac{U}{I}\right)_{(X(j))}^{[N]}$ для $(\beta + \varphi)$ выполняется по (4.1.40).

В направлении по восстанию геоэлектрической границы и склону рельефа дневной поверхности согласно рис. 4.3.2 для N-го отражения :

$$H_0 = N * h_0 ; \quad H_2 = N * h_0 * \frac{x(j)}{\cos \beta} - \frac{x(j)}{\cos \beta} * \cos(\beta + \varphi) * \operatorname{tg}[(N - 1) * (\beta + \varphi)] .$$

Из отношений :

$$\frac{l_1}{\sin \alpha_1} = \frac{H_0}{\sin\{180^\circ - \alpha_1 - [90^\circ - (N - 1) * (\beta + \varphi)]\}} ; \quad (4.3.22)$$

$$\frac{l_2}{\sin \gamma} = \frac{H_2}{\sin\{180^\circ - \gamma - [90^\circ - (N - 1) * (\beta + \varphi)]\}} ; \quad (4.3.23)$$

$$l_1 = \frac{H_0 * \sin \alpha_1}{\cos[\alpha_1 - (N - 1) * (\beta + \varphi)]} ; \quad (4.3.24) .$$

$$l_2 = \frac{H_2 * \sin[\alpha_1 + 2 * (N - 1) * (\beta + \varphi)]}{\cos[\alpha_1 - (N - 1) * (\beta + \varphi)]} . \quad (4.3.25)$$

Из условия равенства проекций на линию геоэлектрической границы (4.3.15) и определения В (4.3.16) запишем

$$H_0 * \sin \alpha_1 + H_2 * \sin[\alpha_1 + 2 * (N - 1) * (\beta + \varphi)] = B * \cos[\alpha_1 - (N - 1) * (\beta + \varphi)] . \quad (4.3.26)$$

Решением (4.3.26) является (4.1.45), с переопределением функции В согласно (4.3.16). Из отношения

$$\frac{R_1}{\cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]} = \frac{H_0}{\cos[\alpha_1 - (N - 1) * (\beta + \varphi)]} \quad (4.3.27)$$

и равенства

$$R_2 = H_2 * \{ \cos \gamma + \sin \gamma * \operatorname{tg}[\gamma + (N - 1) * (\beta + \varphi)] \} \quad (4.3.28)$$

определим

$$R_1 = \frac{H_0 \cos[(N - 1) * (\beta + \varphi)]}{\cos[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) - (N - 1) * (\beta + \varphi)]} , \quad (4.3.29)$$

$$R_2 = H_2 * \{ \cos[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + 2 * (\beta + \varphi) * (N - 1)] + \sin[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) + 2 * (\beta + \varphi) * (N - 1)] * \operatorname{tg}[a \tan(\operatorname{tg} \alpha_1) - (\beta + \varphi) + (N - 1)] \} . \quad (4.3.30)$$

Выражения (4.3.29), (4.3.30) аналогичны (4.1.46), (4.1.47), (4.2.21), (4.2.22), и расчет ρ_k как для уклона геоэлектрической границы так и для ее подъема при $(\beta + \varphi)$ выполняется по формуле (4.1.48), с переопределением в программе VEZLUA функции В.

Угол наклона геоэлектрической границы φ (как уже было отмечено выше) в программе задается выражением

$$\sin \varphi = (h(1) - h_0) / 1 \text{ м} ,$$

где $h(1)$ задаваемая во вводе (Н1F11) глубина до геоэлектрической границы по нормали к последней на расстоянии 1 м. от источника тока. Такое задание определяет направление по падению геоэлектрической границы знаком плюс по падению и знаком минус - по восстанию. Угол β задается во вводе параметром Н1ВЕТА - $hr(1)$, для расчета $\sin \beta = [hr(1) - 0^\circ] / 1 \text{ м}$. При этом знак плюс определяет подъем рельефа, минус - его склон. Суммарный угол $(\beta + \varphi)$ не должен превышать 5-8 градусов, независимо от глубины залегания геоэлектрической границы. Суммарному углу $(\beta + \varphi) = 5^\circ$ соответствует N-пред. ≤ 6 членов ряда.

4.4. О проявляемом при наблюдениях ВЭЗ-ИЛРП отражающем интервале геоэлектрической границы и вкладе в сумму измерений $[U / I]_{(X(j))}$ каждого элемента отражающей площадки.

Определимся какой частью геоэлектрической границы является суммарная отражающая площадка и какой вклад каждый элемент отражающей площадки вносит в суммарный приведенный потенциал U/I .

Для расчетов принято : $h_1 = 10 \text{ м}$.; $AM = 100 \text{ м}$. ; $\beta = 0^\circ$;

1) при $\varphi = 30^\circ$:

$l_1 + l_2 = 86.6 \text{ м}$.; $l_1 = 12.65 \text{ м}$.; $\alpha_1 = 51^\circ 40'$; $r_1 = 16.12 \text{ м}$.; $X\text{-то} = 5.95 \text{ м}$.;

N-пред.= $\operatorname{abs}[90^\circ - 51^\circ.66'] / 60^\circ + 1 = 1$;

точка отражения расположена в 5.95 м. от точки А (питающего электрода);

2) при $\varphi = 25^\circ$:

$l_1 + l_2 = 90.63$ м.; $l_1 = 14.56$ м.; $\alpha_1 = 55^\circ 31'$; $r_1 = 17.66$ м.; X-то = 8.94 м.;

N-пред = $\text{abs}[90^\circ - 55^\circ 52'] / 50^\circ + 1 = 1$;

точка отражения расположена в 8.97 м. от точки А (питающего электрода);

3) при $\varphi = 20^\circ$:

$l_1 + l_2 = 93.97$ м.; $l_1 = 17.33$ м.; $\alpha_1 = 60^\circ 00'$; $r_1 = 20.00$ м.; X-то = 12.86 м.;

N-пред.= $\text{abs}[90^\circ - 60^\circ.00'] / 40^\circ + 1 = 1$;

точка отражения расположена в 12.86 м. от точки А (питающего электрода);

4) при $\varphi = 15^\circ$:

$l_1 + l_2 = 96.59$ м.; $l_1 = 21.05$ м.; $\alpha_1 = 64^\circ 36'$; $r_1 = 23.30$ м.; X-то = 17.72 м.;

N-пред.= $\text{abs}[90^\circ - 64^\circ.36'] / 30^\circ + 1 = 1$;

точка отражения расположена в 12.86 м. от точки А (питающего электрода);

5) при $\varphi = 10^\circ$:

а) при N = 1 :

$l_1 + l_2 = 98.48$ м.; $l_1 = 26.36$ м.; $\alpha_{11} = 69^\circ 13'$; $r_1 = 28.19$ м.; X-то = 24.21 м.;

N-пред.= $\text{abs}[90^\circ - 69^\circ.13'] / 20^\circ + 1 = 2$; h = 27.36 м.;

$l_2 = 72.02$ м.; $r_2 = 75.53$ м.; $r_1 + r_2 = 103.72$ м.;

б) при N = 2 :

$H_0 = 20.0$ м.; $H_2 = 54.72$ м.; B = 100 м.; $\alpha_{12} = 41^\circ 42'$; $l_{12} = 8.98$ м.;

$r_{12} = 13.44$ м.; X-то = 7.06 м.; $\gamma = 61^\circ 42'$; $l_4 = 50.81$ м.; $r_4 = 57.71$ м.;

X-то(3-2) = $100 - r_4 * \sin(\gamma - \varphi) = 54.71$ м. ;

отражающий интервал - [7.06 - 54.71 м.] ; $R_1 = 31.78$ м.; $R_2 = 86.94$ м.;

$R_1 + R_2 = 118.72$ м.

Распределение доли отражения: от точки удаленной от А на 24.21 м. - 55.4 % ;

от точки удаленной от А на 7.06 м. - 22.3 % ; ;

от точки удаленной от А на 54.71 м. - 22.3 % ;

6) при $\varphi = 8^\circ$:

а) при N = 1 :

$l_1 + l_2 = 99.03$ м.; $l_1 = 29.20$ м.; $\alpha_{12} = 71^\circ 06'$; $r_1 = 30.86$ м.; X-то = 27.52 м.;

N-пред.= $\text{abs}[90^\circ - 71^\circ.10'] / 16^\circ + 1 = 2$; $h_j = 23.92$ м.;

$l_2 = 69.83$ м.; $r_2 = 73.81$ м.; $r_1 + r_2 = 103.01$ м.;

б) при N = 2 :

$H_0 = 20.0$ м.; $H_2 = 47.83$ м.; B = 100 м.; $\alpha_{12} = 47^\circ 03'$; $l_{12} = 10.74$ м.;

$r_{12} = 14.67$ м.; $X_{\text{то}} = 9.24$ м.; $\gamma = 63^\circ 03'$; $l_4 = 47.05$ м.; $r_4 = 52.78$ м.;

$X_{\text{то}(3-2)} = 100 - r_4 * \sin(\gamma - \varphi) = 56.73$ м. ;

отражающий интервал - [9.24 - 56.73 м.] ; $R_1 = 28.03$ м.; $R_2 = 78.80$ м.;

$R_1 + R_2 = 106.83$ м.

Распределение доли отражения: от точки удаленной от А на 27.52 м. - 50.89 %;

от точки удаленной от А на 9.24 м. - 24.55 %;;

от точки удаленной от А на 54.71 м. - 24.56 %;;

7) при $\varphi = 5^\circ$:

$l_1 + l_2 = 99.62$ м.; $l_1 = 34.69$ м.; $\alpha_{12} = 73^\circ 55'$; $r_1 = 36.10$ м.; $X_{\text{то}} = 33.68$ м.;

$N\text{-пред.} = \text{abs}[90^\circ - 73^\circ.55'] / 10^\circ + 1 = 2$;

точка отражения расположена в 33.68 м. от точки А (питающего электрода);

8) при $\varphi = 2.5^\circ$:

$l_1 + l_2 = 99.90$ м.; $l_1 = 41.00$ м.; $\alpha_{12} = 76^\circ 18'$; $r_1 = 42.21$ м.; $X_{\text{то}} = 40.53$ м.;

$N\text{-пред.} = \text{abs}[90^\circ - 73^\circ.48'] / 5^\circ + 1 = 4$;

точка отражения расположена в 40.53 м. от точки А (питающего электрода);

9) при $\varphi = 1.0^\circ$:

$l_1 + l_2 = 99.98$ м.; $l_1 = 45.97$ м.; $\alpha_{12} = 77^\circ 43'$; $r_1 = 47.04$ м.; $X_{\text{то}} = 45.78$ м.;

$N\text{-пред.} = \text{abs}[90^\circ - 77^\circ.43'] / 2^\circ + 1 = 7$;

10) при $\varphi = 0.5^\circ$:

1. при $N = 1$:

$l_1 + l_2 = 100.00$ м.; $l_1 = 47.92$ м.; $\alpha_{12} = 78^\circ 13'$; $r_1 = 48.95$; $X_{\text{то}} = 47.83$ м.;

$N\text{-пред.} = \text{abs}[90^\circ - 78^\circ.13'] / 1^\circ + 1 = 12$ членов ряда;

$r_2 = 53.2$ м.; $X_{\text{то}(1)} = 47.83$ м.; $r_1 + r_2 = 101.12$ м.;

2. при $N = 2$:

$H_{03} = 20$ м.; $H_{22} = 21.74$ м.; $\alpha_{12} = 66^\circ 50'$; $r_1 = 25.42$ м.; $r_2 = 54.73$ м.;

$X_{\text{то}(1)} = 23.28$ м.; $X_{\text{то}(2)} = 49.14$ м.; $R_1 + R_2 = 112.81$ м.;

3. при $N = 3$:

$H_{04} = 30$ м.; $H_{24} = 32.62$ м.; $\alpha_{12} = 57^\circ 00'$; $r_1 = 18.36$ м.;

$X_{\text{то}(1)} = 15.31$ м.; $X_{\text{то}(2)} = 49.68$ м.; $X_{\text{то}(3)} = 82.20$ м.; $R_1 + R_2 = 121.57$ м.;

4. при $N = 4$:

$H_{04} = 40$ м.; $H_{24} = 43.49$ м.; $\alpha_{12} = 48^\circ 38'$; $r_1 = 16.85$ м.;

Далее расчеты выполнены по составленной автором программе VEZLUA на основе нижеописанного алгоритма, построенного в соответствии с рис. 43.1:

I = 1:

$$r_1 = h_0 / \cos \alpha_1 ; XTO(1) = r_1 * \sin(\alpha_1 - \varphi);$$

$$r_2 = r_1 * \cos(\alpha_1 - \varphi) / \cos(\alpha_1 + \varphi); BB = K12; RR = r_1 + r_2 ; UOT(1) = BB/RR$$

I = 2:

$$r_3 = r_1 * \cos \alpha_1 / \cos(\alpha_1 + (I-1)*2*\varphi);$$

$$B = r_2 * \cos \alpha_1 * [\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg}(\alpha_1 + 2 * \varphi)]; XTO(2) = XTO(1) + B * \cos \varphi ;$$

```
PROGRAM VEZLUA          ! VEZLUA.FOR PO TREM KRIVIM - 2-XSLOIN NAKLON RAZREZ
  REAL X(24),REST(24),RO(10),H(9),H1XJ1,H10,XJ,XTO(15),ALF1,FI
  REAL(8)      R1,R2,R3,B,R12,R13,UOT(15),K12,UOTNPR
  REAL CINPR,H2,RL1,RL2,RR,ALF(15),BB
  REAL RESGR(24),RESPS(24)
    ! REAL(8)  REST(24),RO(3),RE11(24),XM,B,RW,DW,TH,PLI(9)
    ! REAL(8) SR1,OPRED,SR2,SR3,SR4,SR5,SR6,SR7

    ! REAL(8) OPRED1,AM3(9),AM4(9),AM5(9),AM6(9)
    ! REAL(8) PL1,PL2,PL3,PL4,PL5,PLI1,PLI2,PLI3,PLI4,PLI5
    ! REAL(8)  MI1,MI2,MI3,MI4,MI5,MII1,MII2,MII3,MII4,MII5
    ! REAL(8)  A(9,9),AM1(9),AM2(9),AM7,AO(4),D(9,9)
  INTEGER NS,NR,ISICOI,NPRED,NPR,REG
    !      NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
  PRINT*,'VVEDITE REG'
  READ*,REG

    ! REG = 1  RASCET SPEKTRA
    ! REG = 2      RASCET 2 -X SLOYINIX KRIVIX
  PRINT*,'VVEDITE NS'      ! NS - KOL-VO SLOEV
  READ*,NS
  PRINT*,'VVEDITE RO(I)'  ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
  READ*,(RO(I),I=1,NS)
  IF(REG.EQ.1) GOTO 708
  PRINT*,'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
  READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
  PRINT*,'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV
  READ*,NR
656  X(1)=1.0
    Q=1.389
    DO 703 I=2,NR
      X(I)=X(I-1)*Q
703  CONTINUE
    PRINT*,'VVEDITE H1XJ1'
    READ*,H1XJ1
    PRINT*,'VVEDITE ISICOI'
    READ*,ISICOI
    ! 1 - RASCET UGLOV; 2 - RASCET GORISONT.
  CALL KGMI(NS,NR,H,RO,X,REST,H1XJ1,ISICOI,RESGR,RESPS)
  PRINT*,'VIVOD X(I)'
  PRINT 707,(X(I),I=1,NR)
707  FORMAT(5X, 'X( )=',F8.4)
  PAUSE
  PRINT*,'VIVOD REST(I)'
  PRINT 705,(REST(I),I=1,NR)
705  FORMAT(5X, 'REST( )=',E16.10)
  PAUSE
  PRINT*,'VIVOD RESGR(I)'
  PRINT 721,(RESGR(I),I=1,NR)
721  FORMAT(5X, 'RESGR( )=',E16.10)
  PAUSE
  PRINT*,'VIVOD RESPS(I)'
  PRINT 722,(RESPS(I),I=1,NR)
722  FORMAT(5X, 'RESPS( )=',E16.10)
```

```

PAUSE
IF(REG.EQ.2) GOTO 712
708 CONTINUE
K12=(RO(2)-RO(1))/(RO(2)+RO(1))
PRINT*, 'VVEDITE NPRED'
READ*, NPRED
PRINT*, 'VVEDITE ALF(I)' ! IN GRADUSAX
READ*, (ALF(I), I=4, NPRED)
CNPRED=NPRED
PRINT*, 'VVEDITE FI' ! IN GRADUSAX
READ*, FI
PRINT*, 'VVEDITE XJ'
READ*, XJ
PRINT*, 'VVEDITE H10'
716 READ*, H10
CONTINUE
DO 710 NPR=4, NPRED
CINPR=NPR
ALF1=ALF(NPR)*3.1415926D0/180.D0 ! IN RADIANAX
FI=FI*3.1415926D0/180.D0 ! IN RADIANAX
I=1
R1=H10/COS(ALF1)
XTO(1)=R1*SIN(ALF1-FI)
R2=R1*COS(ALF1-FI)/COS(ALF1+FI)
BB=K12
RR=R1+R2
UOT(1)=BB/RR
I=2
CI=I
R3=R2*COS(ALF1)/COS(ALF1+(CI-1.)*2.*FI)
B=R2*(SIN(ALF1)+COS(ALF1)*TAN(ALF1+2.*FI))
XTO(2)=XTO(1)+B*COS(FI)
R13=R3*COS(ALF1+((CI-1.)*2.-1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*
*FI) ! R4
BB=BB*K12
RR=RR+R3+R13
UOT(2)=BB/RR
I=3
CI=3
R12=R13*COS(ALF1+2.*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+2.*FI*(CI-2.))
B=R13*(SIN(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)+COS(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)*TAN(ALF1+
*(CI-1.)*2.*FI))
XTO(3)=XTO(2)+B*COS(FI)
R13=R12*COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
*2.-1.)*FI)
BB=BB*K12
RR=RR+R12+R13
UOT(3)=BB/RR
DO 709 I=4, NPR
CI=I
R12=R13*COS(ALF1+2.*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+2.*FI*(CI-2.))
B=R13*COS(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)*(TAN(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)+TAN(ALF1+
*2.*FI*(CI-1.)))
XTO(I)=XTO(I-1)+COS(FI)*B
R13=R12*COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
*2.-1.)*2.*FI)
BB=BB*K12
RR=RR+R12+R13
UOT(I)=BB/RR
! IF(I.EQ.NPR) UOT(I)=1./((1./UOT(I))+R13)
709 CONTINUE
CINPR=NPR
RL1=H10*CINPR*(COS(ALF1)+SIN(ALF1)*TAN(ALF1+(CINPR-1.)*FI))
H2=H10*CINPR+XJ*SIN(FI)+XJ*COS(FI)*TAN((CINPR-1.)*FI)
RL2=H2*COS((CINPR-1.)*FI)/COS(ALF1+(CINPR-1.)*FI)
RR=RL1+RL2
UOTNPR=(K12**NPR)/RR
PRINT*, 'VIYOD RR'
PRINT 717, RR

```

```

717   FORMAT(5X, 'RR=',F10.6)
      PRINT*, 'VIVOD XTO(I)'
      PRINT 715, (XTO(I), I=1, NPR)
715   FORMAT(5X, ' XTO(  )=',E16.10)
      PAUSE
      PRINT*, 'VIVOD UOT(I)'
      PRINT 718, (UOT(I), I=1, NPR)
718   FORMAT(5X, ' UOT(  )=',E16.10)
      PRINT*, 'VIVOD UOTNPR'
      PRINT 719, UOTNPR
719   FORMAT(5X, ' UOTNPR=',E16.10)
      PAUSE
710   CONTINUE
712   CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE KGMI(NN, NS, H, RO, X, REST, H1XJ1, ISICOI, RESGR, RESPS)
      REAL REST(24), RO(10), H(9), X(24), CI, H1XJ1, H10, H21, R1, R2, XJ1
      REAL RESGR(24), RESPS(24)
      REAL(8) K12, SNJ, B(4200), S(4200), SR, SRA, Z, A5, R11, R21, SGR(4200)
      REAL(8) SINFI, FI, DL1, DL2, COSFI, TGAL, R3, BN, H1N, H2N, COSAL, ZGR
      INTEGER NN, NS, N(30), NPRED, ISICOI
      NS=16
      NN=2
          ! NN - KOL-VO SLOEV
          ! NS - KOL-VO RAZNOSOV
      RO1=RO(1)
      RO2=RO(2)
      K12=(RO(2)-RO(1))/(RO(2)+RO(1))
      ! RO3=RO(3)
      H1=H(1)
      IF(ISICOI.EQ.1) GOTO 7
          ! H2=H(2)
      N(1)=75
      N(2)=82
      N(3)=100
      N(4)=113
      N(5)=140
      N(6)=185
      N(7)=235
      N(8)=310
      N(9)=430
      N(10)=600
      N(11)=840
      N(12)=1160
      N(13)=1500
      N(14)=2200
      N(15)=2900
      N(16)=4100
          ! RABOTA FOR GORIZONT
      DO 5 J=1, NS
          XJ=X(J)
      RJ=X(J)/H1
      NJ=N(J)
      I=1
      B(1)=K12
      SR=RJ/DSQRT(RJ*RJ+2.D0*2.D0)
      S(1)=K12*SR
      SGR(1)=K12*SR*SR*SR
      DO 6 I=2, NJ
          CI=I
          B(I)=K12*B(I-1)
          SRA=RJ/DSQRT(RJ*RJ+2.D0*CI*2.D0*CI)
          Z=SRA
          S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
          ZGR=SRA*SRA*SRA
          SGR(I)=ZGR*B(I)+SGR(I-1)
6      CONTINUE
      SNJ=S(NJ)

```

```

    REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
    SGRNG=SGR(NJ)
    RESGR(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SGRNJ)
5  CONTINUE
    IF(ISICOI.NE.1) GOTO 21
7  CONTINUE
    H10=H1
    SINFI=(H1XJ1-H10)/1.D0
    FI=ASIN(SINFI)
    COSFI=COS(FI)          ! DSQRT(1.D0-SINFI*SINFI)
    NPRED=INT(90./(2.*ABS(FI)))+1
    DO 8 J=1,NS
    NJ=NPRED
    XJ1=X(J)
    I=1
    DL1=H10*XJ1*COSFI/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
    DL2=XJ1*COSFI*(1.D0-H10/(2.D0*H10+XJ1*SINFI))
    H21=H10+XJ1*SINFI
    R1=DSQRT(H10*H10+DL1*DL1)
    COSAL=H10/R1
    R2=(H10+X(J)*SINFI)/COSAL    ! DSQRT(H21*H21+DL2*DL2)
    B(1)=K12
    SR=XJ1/(R1+R2)
    S(1)=K12*SR
    SGR(1)=K12*SR*SR*SR
    DO 9 I=2,NPRED
    RO1=RO(1)
    RO2=RO(2)
    CI=I
    H1N=H10*CI
    A5=1.D0
    IF(SINFI.LT.0.D0) A5=-1.D0
    H2N=H1N+X(J)*SINFI+A5*X(J)*COSFI*TAN((CI-1.)*FI)
    BN=X(J)*COSFI/COS((CI-1.)*FI)
    TGAL=(BN*COS((CI-1.)*FI)-A5*H2N*SIN(2.*(CI-1.)*FI))/
    *(H1N+H2N*COS(2.*(CI-1.)*FI)+A5*BN*SIN((CI-1.)*FI))
    B(I)=K12*B(I-1)
    R1I=H1N*(COS(ATAN(TGAL))+SIN(ATAN(TGAL))*TAN(ATAN(TGAL)+A5*
    *(CI-1.)*FI))
    R2I=H2N*COS((CI-1.)*FI)/COS(ATAN(TGAL)+A5*(CI-1.)*FI)
    R3=R1I+R2I          ! ((H1N+H2N)*COS((CI-1.)*FI)/
    ! *(COS(ATAN(TGAL)+A5*(CI-1.)*FI))
    SRA=XJ1/R3
    Z=SRA
    S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
    ZGR=SRA*SRA*SRA
    SGR(I)=ZGR*B(I)+SGR(I-1)
9  CONTINUE
    SNJ=S(NJ)
    REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
    SGRNJ=SGR(NJ)
    RESGR(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SGRNJ)
    RESPS(J)=REST(J)*REST(J)/RESGR(J)
8  CONTINUE
21 CONTINUE
    RETURN
    END

```

$$R13 = r_1 * \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2-1)* \varphi) / \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2+1)* \varphi);$$

! r4

$$BB=BB*K12; RR=RR+R3+R13; UOT(2) = BB/RR;$$

A

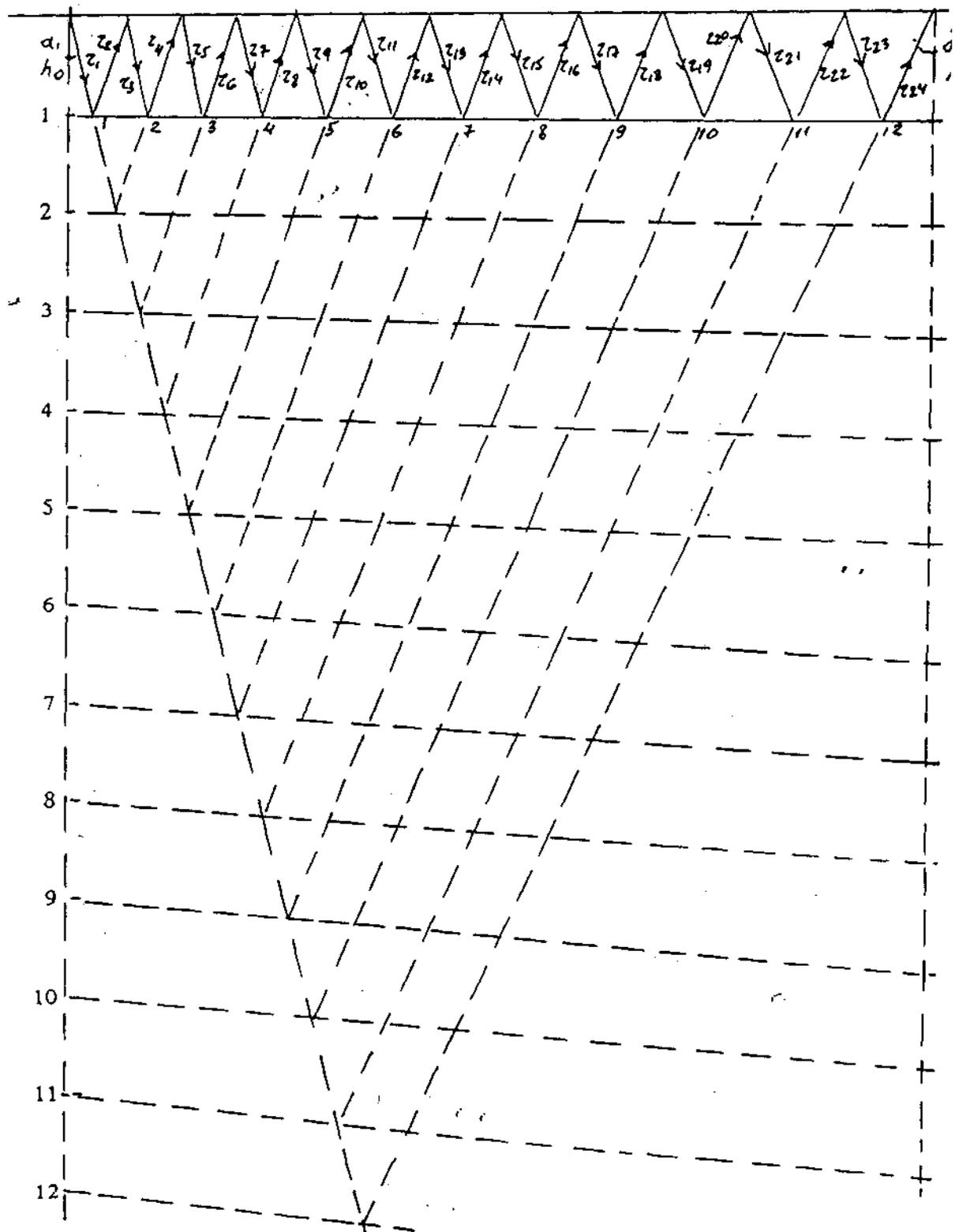


Рис. 4.4.1 Ход лучей при наклонной геоэлектрической границе для случая многократного отражения (N = 12)

I=3

$$R_{12} = R_{13} * \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2* \varphi) / \cos(\alpha_1 + ((I-2)*2* \varphi)); \quad ! r_5$$

$$B = R_{13} * \sin[\alpha_1 + (I-2)*2* \varphi] + \cos[\alpha_1 + (I-2)*2* \varphi] * \operatorname{tg}[\alpha_1 + (I-2)*2* \varphi]$$

$$XTO(3) = XTO(2) + B * \cos \varphi;$$

$$R_{13} = R_{12} * \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2+1)* \varphi) / \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2-1)* \varphi); \quad ! r_6$$

$$BB = BB * K_{12}; RR = RR + R_{12} + R_{13}; UOT(3) = BB / RR;$$

и далее при $N \geq 4$ по рекуррентным формулам :

$$R_{12} = R_{13} * \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2* \varphi) / \cos(\alpha_1 + ((I-2)*2* \varphi)); \quad ! r_7$$

$$R_{13} = R_{12} * \cos(\alpha_1 + ((I-2)*2+1)* \varphi) / \cos(\alpha_1 + ((I-1)*2-1)* \varphi); \quad ! r_8$$

$$B = R_{13} * \cos[\alpha_1 + (I-1)*2* \varphi] * \{ \operatorname{tg}[\alpha_1 + (I-2)*2* \varphi] + \operatorname{tg}[(\alpha_1 + 2* \varphi * (I-1))] \};$$

$$XTO(i) = XTO(I-1) + B * \cos \varphi; BB = BB * K_{12}; RR = RR + R_{12} + R_{13}; UOT(i) = BB / RR;$$

$$R_1 = I * h_0 * \{ \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 * \operatorname{tg}[\alpha_1 + (I-1) * \varphi] \}$$

$$R_2 = H_2 * \cos[(I-1)* \varphi] / \cos[\alpha_1 + (I-1) * \varphi]$$

$$RR = R_1 + R_2.$$

В результате при $N = 4$ и $\alpha_1 = 48^\circ 38'$ получили :

$$XTO(1) = 11.27; XTO(2) = 34.85; XTO(3) = 59.78; XTO(4) = 84.04; RR = 129.52.$$

5. при $N = 5$:

$$H_{05} = 50 \text{ м.}; H_{25} = 54.36 \text{ м.}; \alpha_1 = 41^\circ 46';$$

$$XTO(1) = 8.93; XTO(2) = 26.80; XTO(3) = 44.69; XTO(4) = 62.58; XTO(5) = 80.46; RR = 134.25;$$

6. при $N = 6$:

$$H_{06} = 60 \text{ м.}; H_{26} = 65.24 \text{ м.}; \alpha_1 = 36^\circ 06';$$

$$XTO(1) = 7.29; XTO(2) = 21.88; XTO(3) = 36.46; XTO(4) = 51.04; XTO(5) = 65.03;$$

$$XTO(6) = 80.21; RR = 148.52;$$

7. при $N = 7$:

$$H_{07} = 70 \text{ м.}; H_{27} = 76.11 \text{ м.}; \alpha_1 = 31^\circ 23';$$

$$XTO(1) = 6.22; XTO(2) = 18.66; XTO(3) = 31.10; XTO(4) = 43.54; XTO(5) = 55.98;$$

$$XTO(6) = 68.42; XTO(7) = 80.85; RR = 164.87;$$

8. при $N = 8$:

$$H_{08} = 80 \text{ м.}; H_{28} = 86.89 \text{ м.}; \alpha_1 = 28^\circ 17';$$

$$XTO(1) = 5.38; XTO(2) = 16.14; XTO(3) = 26.90; XTO(4) = 37.66; XTO(5) = 48.42;$$

$$XTO(6) = 59.18; XTO(7) = 69.94; XTO(8) = 80.70; RR = 181.68;$$

9. при N = 9 :

$H_{09} = 90$ м.; $H_{29} = 97.86$ м.; $\alpha_1 = 24^\circ 00'$;

XTO(1)=4.45; XTO(2)=13.36; XTO(3)=22.26; XTO(4)=31.16; XTO(5)=40.07;

XTO(6)=48.98; XTO(7)=57.88; XTO(8)=66.78; XTO(9)=75.69; RR = 197.03;

10. при N = 10 :

$H_{010} = 100$ м.; $H_{210} = 108.74$ м.; $\alpha_1 = 21^\circ 06'$;

XTO(1)=3.86; XTO(2)=11.58; XTO(3)=19.29; XTO(4)=27.01; XTO(5)=34.73; XTO(6)=

42.44; XTO(7)=50.16; XTO(8)=57.88; XTO(9)=65.60; XTO(10)=73.31; RR = 214.37;

11. при N = 11 :

$H_{011} = 110$ м.; $H_{211} = 119.62$ м.; $\alpha_1 = 18^\circ 31'$;

XTO(1)=3.35; XTO(2)=10.04; XTO(3)=16.75; XTO(4)=23.44; XTO(5)=30.15; XTO(6)=

36.84; XTO(7)=43.55; XTO(8)=50.24; XTO(9)=56.95; XTO(10)=63.65; XTO(11)=70.34;

RR = 232.01;

12. при N = 12 :

$H_{012} = 120$ м.; $H_{212} = 130.05$ м.; $\alpha_1 = 16^\circ 14'$;

XTO(1)=2.91; XTO(2)=8.73; XTO(3)=14.55; XTO(4)=20.38; XTO(5)=26.20; XTO(6)=

32.02; XTO(7)=37.84; XTO(8)=43.66; XTO(9)=49.49; XTO(10)=55.31; XTO(11)=61.31;

XTO(12)=66.95; ; RR = 250.0;

Полученные результаты вычислений абсцисс точек отражений (XTO(I) от наклонной (при $\varphi = 0.5^\circ$) геоэлектрической границы позволили получить **некоторую систему точек многократных отражений** от геоэлектрической границы и соответствующих им формул определения величин отраженного потенциала (UOT(I)), с выходом луча UOT(I) на дневную поверхность.

Согласно формуле (4.1.37) угол α_1 и соответственно система распределения точек отражения XTO(I) зависит только от геометрических параметров - величин разноса AM (XJ), глубин до геоэлектрической границы (h_0 , h_o), угла наклона геоэлектрической границы (φ) и кратности отражения (i). На рис. 4.4.2 приведена гистограмма распределения доли отражения каждого пятиметрового элемента геоэлектрической границы, при определении доли отражения отдельной точки XTO(I) на каждом шаге N по формуле $D = 1 / N$.

Суммарная доля отражения – $D = 1 / N$

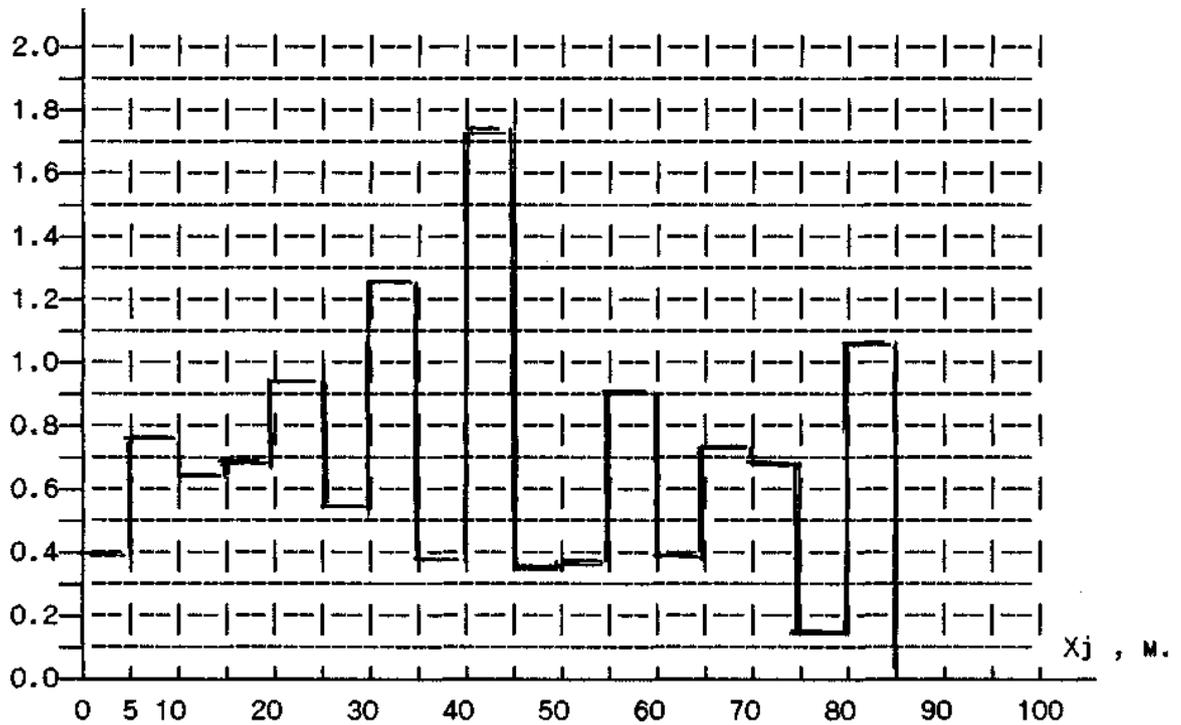


Рис. 4.4.2. Гистограмм распределения доли отражения каждого пятиметрового элемента геоэлектрической границы, при определении доли отражения отдельной точки ХТО(i) на каждом шаге N по формуле $D = 1/N$ (при $\varphi = 0.5^\circ$ $X_j = 100$ м , $h = 10$ м.)

Разумеется, это распределение является частным для заданных параметров; но оно не зависит от величин удельных сопротивлений первого и второго слоя. Это распределение ограничено данными для 12-ти членов ряда. При весьма выраженной ступенчатости гистограммы становится очевидным, что наибольший вклад в суммарное отражение вносит первая, ближняя к питающему электроду A , половина геоэлектрической границы. Максимум гистограммы проявляется на интервале [40 - 45 м.] разноса AM . Это и следовало ожидать из выше приведенных логических суждений.

В табл. 4.4.1 приведены расчетные величины $UOT(I)$, соответствующие описанным ранее значениям $XTO(I)$. Они получены для $\rho_1 = 100$ Омм и $\rho_2 = 20$ Омм. Алгоритм расчета согласно рис. 4.4.1 включает:

$$I = 1; BB=K12; \quad (4.4.1) \quad RR=r_1 + r_2; \quad (4.4.2) \quad UOT(1)=BB/RR; \quad (4.4.3)$$

$$I = 2; BB = BB * K12; \quad RR=RR+(r_3 + r_4); \quad UOT(2)=BB/RR;$$

$$I = 3; BB = BB * K12; \quad RR=RR+(r_5 + r_6); \quad UOT(3)=BB/RR$$

и так далее.

$$I = i; \quad BB = BB * K12; \quad RR = RR + (r_{2*i-1} + r_{2*i}); \quad (4.4.4) \quad UOT(i) = BB / RR. \quad (4.4.5)$$

Представленный алгоритм и рис. 4.4.1 позволяют отметить, что на каждом шаге по i может быть учтен коэффициент отражения, соответствующий каждой отражающей точке ХТО(I). Таким образом, мы подошли к возможности расчета теоретических кривых ρ_k потенц.-зонд. при горизонтальном градиенте величин ρ_1 и ρ_2 .

4.5. Расчет методом многократных отражений двухслойных кривых ρ_k потенц.-зонд. при горизонтальном градиенте послойных величин ρ_1 и ρ_2 .

Счет кривых ρ_k потенц.-зонд. при изменении величин ρ_1 и ρ_2 в пределах разноса электродов AM реализован в программе VEZFDP. При этом коэффициент отражения $K12(x)$ становится индексированным по x , в зависимости от переменных $\rho_1(x)$ и $\rho_2(x)$,

$$K_{12(x)} = \frac{\rho_2(x) - \rho_1(x)}{\rho_2(x) + \rho_1(x)} \quad (4.5.1)$$

в соответствии с алгоритмом:

- 1) $XJ = X_{AM(max)}$;
- 2) $IKONRO = ABS(x) + 1$;
- 3) Задайте KVORO1 - количество интервалов разбиения по ρ_1 ;
- 4) Задайте KVORO2 - количество интервалов разбиения по ρ_2 ;
- 5) Задайте конечные значения интервалов разбиения по ρ_1 ($X1KON(IN)$) и ρ_2 ($X2KON(IN)$) и интервальные величины ρ_1 - $RO11(IN)$ и ρ_2 $RO21(IN)$;
- 6) Счет и заполнение массивов $\rho_1(x)$ и $\rho_2(x)$ по условиям:

если $i \leq (ABS(X1KON(IN))$ $\rho_1(x) = RO11(IN)$;

если $i \leq (ABS(X2KON(IN))$ $\rho_2(x) = RO21(IN)$;

- 7) Определение в цикле $i = 1, IKONRO$

$$K12I(I) = (RO2(i) - RO1(i)) / (RO2(i) + RO1(i)); \quad (4.5.2)$$

- 8) Расчет по счетчику от $J=1$ (1-ый разнос AM) до $J=NS$ (максимальный разнос AM)

значений $\rho_k = f(j)$ по условию:

если $x(j) > X1KON1$ или $x(j) > X2KON1$

переход на расчет ρ_k по формулам для горизонтального градиента по ρ_1 и ρ_2 , с использованием модели трех вложенных циклов:

1-ый цикл по разносам AM : $J = J + 1$;

2-ой цикл по членам суммы ряда : $NPR = \text{от } 1 \text{ до } NPRED$;

3-ий цикл по представлению члена суммы ряда в виде суммы

многократных отражений (по i от 1 до NPR), дающий возможность учитывать коэффициент отражения в каждой точке отражения от геоэлектрической границы

$NPR = 1$;

$BB = K12I(ABS(XTO(I)))$; $RR = r_1 + r_2$; $UOT(1) = BB/RR$;

$NPR = \text{от } 2 \text{ до } NPRED$, где $NPRED = (ABS((90^\circ - \alpha_1) / 2 * \varphi)) + 1$,

при $x(j) < 20$ м. и $\sin \alpha_1 < 0.02$ $NPRED = NPRED / 5$;

$I = 1$;

$BB = K12I(ABS(XTO(1)))$; $RR = r_1 + r_2$; $UOT(1) = BB / RR$;

$I = 2$;

$BB = BB * K12I(ABS(XTO(2)))$; $RR = r_3 + r_4$; $UOT(2) = BB/RR$;

Если $(i + 1) > NPR$ - выход с цикла по NPR ;

$I = 3$;

$BB = BB * K12I(ABS(XTO(3)))$; $RR = r_5 + r_6$; $UOT(3) = BB / RR$;

Если $(i + 1) > NPR$ - выход с цикла по NPR ;

Далее в цикле $I = \text{от } 4 \text{ до } NPR$:

$BB = BB * K12I(ABS(XTO(I)))$; $RR = r_{2*i-1} + r_{2*i}$; $UOT(I) = BB / RR$;

Закрытие 3-го цикла по I с суммированием

$S(NPR) = S(NPR - 1) + UOT(NPR)$;

Закрытие 2-го цикла по NPR с суммированием $SNJ = S(NPRED)$;

Расчет значений $\rho_k(j)$:

$REST(j) = \rho_1 * (1. + XJ1 * 2 * SNJ)$;

Закрытие первого цикла.

В табл. 4.5.1 приведены значения ρ_k , полученные по программе VEZFDP при горизонтальном градиенте величин ρ_1 и ρ_2 для различных исходных данных.

```

PROGRAM VEZFPD      ! VEZ PO FI AND DELTA R PO GORIZONTALI
  REAL X(24),REST(24),RO(10),H(9),H1XJ1,H10,XJ,XTO(15),ALF1,FI
  REAL X1KON(50),X2KON(50),X1KON1,X2KON1
  REAL(8)   R1,R2,R3,B,R12,R13,UOT(15),UOTNPR
  REAL(8) K12I(150),RO1(150),RO2(150),RO11(50),RO21(50),BB
  REAL CINPR,H2,RL1,RL2,RR,ALF(15)
    ! REAL(8)  REST(24),RO(3),RE11(24),XM,B,RW,DW,TH,PLI(9)
    ! REAL(8) SR1,OPRED,SR2,SR3,SR4,SR5,SR6,SR7
    ! REAL(8) OPRED1,AM3(9),AM4(9),AM5(9),AM6(9)
    ! REAL(8) PL1,PL2,PL3,PL4,PL5,PLI1,PLI2,PLI3,PLI4,PLI5
    ! REAL(8)  MI1,MI2,MI3,MI4,MI5,MII1,MII2,MII3,MII4,MII5
    ! REAL(8)  A(9,9),AM1(9),AM2(9),AM7,AO(4),D(9,9)
  INTEGER NS,NR,ISICOI,NPRED,NPR,REG,IKONRO
    ! NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
  PRINT*, 'VVEDITE REG'
  READ*,REG
    ! REG = 1  RASCET SPEKTRA
    ! REG = 2  RASCET 2 -X SLOYINIX KRIVIX
  PRINT*, 'VVEDITE NS'      ! NS - KOL-VO SLOEV
  READ*,NS
  PRINT*, 'VVEDITE RO(I)'  ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
  READ*,(RO(I),I=1,NS)
  PRINT*, 'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
  READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
  PRINT*, 'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV
  READ*,NR
656  X(1)=1.0
    Q=1.389
    DO 703 I=2,NR
      X(I)=X(I-1)*Q
703  CONTINUE
    XJ=X(NR)
  PRINT*, 'VVEDITE IKONRO'
  READ*,IKONRO
  PRINT*, 'VVEDITE KVORO1'
  READ*,KVORO1
  PRINT*, 'VVEDITE RO11(IN)'
  READ*,(RO11(IN),IN=1,KVORO1)
  PRINT*, 'VVEDITE X1KON(IN)'
  READ*,(X1KON(IN),IN=1,KVORO1)
  X1KON1=X1KON(1)
  DO 1 IN=1,KVORO1
    I=1
3  CONTINUE
  IF(I.LE.(ABS(X1KON(IN)))) RO1(I)=RO11(IN)
  IF(I.GT.(ABS(X1KON(IN)))) GOTO 1
  I=I+1
  GOTO 3
1  CONTINUE
  PRINT*, 'VVEDITE KVORO2'
  READ*,KVORO2
  PRINT*, 'VVEDITE RO21(IN)'
  READ*,(RO21(IN),IN=1,KVORO2)
  PRINT*, 'VVEDITE X2KON(IN)'
  READ*,(X2KON(IN),IN=1,KVORO2)
  X2KON1=X2KON(1)
  DO 2 IN=1,KVORO2
    I=1
4  CONTINUE
  I2X2K=ABS(X2KON(IN))
  IF(I.LE.I2X2K) RO2(I)=RO21(IN)
  IF(I.GT.I2X2K) GOTO 2
  I=I+1
  GOTO 4
2  CONTINUE
  DO 5 I=1,IKONRO
    K12I(I)=(RO2(I)-RO1(I))/(RO2(I)+RO1(I))

```

```

5      CONTINUE
      IF(REG.EQ.1) GOTO 708
      PRINT*, 'VVEDITE H1XJ1'
      READ*, H1XJ1
      PRINT*, 'VVEDITE ISICOI'
      READ*, ISICOI
      ! 1 - RASCET UGLOV; 2 - RASCET GORISONT.
      CALL KGMI(NS, NR, H, RO, X, REST, H1XJ1, ISICOI, K12I, X1KON1, X2KON1)
      PRINT*, 'VIVOD X(I)'
      PRINT 707, (X(I), I=1, NR)
707    FORMAT(5X, ' X( )=', F8.4)
      PAUSE
      PRINT*, 'VIVOD REST(I)'
      PRINT 705, (REST(I), I=1, NR)
705    FORMAT(5X, ' REST( )=', E16.10)
      PAUSE
      IF(REG.EQ.2) GOTO 712
708    CONTINUE
      PRINT*, 'VVEDITE NPRED'
      READ*, NPRED
      PRINT*, 'VVEDITE ALF(I)' ! IN GRADUSAX
      READ*, (ALF(I), I=4, NPRED)
      ! CNPRED=NPRED
      PRINT*, 'VVEDITE FI' ! IN GRADUSAX
      READ*, FI
      PRINT*, 'VVEDITE XJ'
      READ*, XJ
      PRINT*, 'VVEDITE H10'
      READ*, H10
716    CONTINUE
      DO 710 NPR=1, NPRED
      CINPR= NPR
      ALF1=ALF(NPR)*3.1415926D0/180.D0 ! IN RADIANAX
      FI=FI*3.1415926D0/180.D0 ! IN RADIANAX
      I=1
      R1=H10/COS(ALF1)
      XTO(1)=R1*SIN(ALF1-FI)
      R2=R1*COS(ALF1-FI)/COS(ALF1+FI)
      IXTOI=ABS(XTO(1))
      BB=K12I(IXTOI)
      RR=R1+R2
      UOT(1)=BB/RR
      IF((I+1).GT.NPR) GOTO 710
      I=2
      CI=I
      R3=R2*COS(ALF1)/COS(ALF1+(CI-1.)*2.*FI)
      B=R2*(SIN(ALF1)+COS(ALF1)*TAN(ALF1+2.*FI))
      XTO(2)=XTO(1)+B*COS(FI)
      R13=R3*COS(ALF1+((CI-1.)*2.-1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*
      *FI) ! R4
      IXTO2=ABS(XTO(2))
      BB=BB*K12I(IXTO2)
      RR=RR+R3+R13
      UOT(2)=BB/RR
      IF((I+1).GT.NPR) GOTO 710
      I=3
      CI=I
      R12=R13*COS(ALF1+2.*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+2.*FI*(CI-2.))
      B=R13*(SIN(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)+COS(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)*TAN(ALF1+
      *(CI-1.)*2.*FI))
      XTO(3)=XTO(2)+B*COS(FI)
      R13=R12*COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
      *2.-1.)*FI)
      IXTO3=ABS(XTO(3))
      BB=BB*K12I(IXTO3)
      RR=RR+R12+R13
      UOT(3)=BB/RR
      IF((I+1).GT.NPR) GOTO 710
      DO 709 I=4, NPR

```

```

CI=I
R12=R13*COS(ALF1+2.*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+2.*FI*(CI-2.))
B=R13*COS(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)*(TAN(ALF1+(CI-2.)*2.*FI)+TAN(ALF1+
*2.*FI*(CI-1.)))
XTO(I)=XTO(I-1)+COS(FI)*B
R13=R12*COS(ALF1+((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
*2.-1.)*2.*FI)
IXTOI=ABS(XTO(I))
BB=BB*K12I(IXTOI)
RR=RR+R12+R13
UOT(I)=BB/RR
709 CONTINUE
CINPR=NPR
RL1=H10*CINPR*(COS(ALF1)+SIN(ALF1)*TAN(ALF1+(CINPR-1.)*FI))
H2=H10*CINPR+XJ*SIN(FI)+XJ*COS(FI)*TAN((CINPR-1.)*FI)
RL2=H2*COS((CINPR-1.)*FI)/COS(ALF1+(CINPR-1.)*FI)
RR=RL1+RL2
UOTNPR=((RO(2)-RO(1))/(RO(2)+RO(1)))*CINPR/RR
PRINT*, 'VIYOD RR'
PRINT 717,RR
717 FORMAT(5X, ' RR=',F10.6)
PRINT*, 'VIVOD XTO(I)'
PRINT 715,(XTO(I),I=1,NPR)
715 FORMAT(5X, ' XTO( )=',E16.10)
PAUSE
PRINT*, 'VIVOD UOT(I)'
PRINT 718,(UOT(I),I=1,NPR)
718 FORMAT(5X, ' UOT( )=',E16.10)
PRINT*, 'VIVOD UOTNPR'
PRINT 719,UOTNPR
719 FORMAT(5X, ' UOTNPR=',E16.10)
PAUSE
710 CONTINUE
712 CONTINUE
STOP
END
SUBROUTINE KGMI(NN,NS,H,RO,X,REST,H1XJ1,ISICOI,K12I,X1KON1,
*X2KON1)
REAL REST(24),RO(10),H(9),X(24),CI,H1XJ1,H10,H21,XJ1,H1,CI1
REAL(8) UOT(50),XTO(50),K12I(150),B1,R1,R2,R12,R13
REAL(8) K12,SNJ,B(4200),S(4200),SR,SRA,Z,A5,BB,ALF1
REAL(8) SINFI,FI,DL1,DL2,COSFI,TGAL,R3,BN,H1N,H2N,COSAL
REAL(8) RR,R1I,R2I
REAL X1KON1,X2KON1
INTEGER NN,NS,N(30),NPRED,ISICOI
NS=15
NN=2
! NN - KOL-VO SLOEV
! NS - KOL-VO RAZNOSOV
RO1=RO(1)
RO2=RO(2)
K12=(RO(2)-RO(1))/(RO(2)+RO(1))
! RO3=RO(3)
H1=H(1)
IF(ISICOLEQ.1) GOTO 7
! H2=H(2)
N(1)=75
N(2)=82
N(3)=100
N(4)=113
N(5)=140
N(6)=185
N(7)=235
N(8)=310
N(9)=430
N(10)=600
N(11)=840
N(12)=1160
N(13)=1500

```

```

N(14)=2200
N(15)=2900
N(16)=4100
  ! RABOTA FOR GORIZONT
DO 5 J=1,NS
  XJ=X(J)
RJ=X(J)/H1
  NJ=N(J)
  I=1
  B(1)=K12
  SR=RJ/DSQRT(RJ*RJ+2.D0*2.D0)
  S(1)=K12*SR
  DO 6 I=2,NJ
  CI=I
  B(I)=K12*B(I-1)
  SRA=RJ/DSQRT(RJ*RJ+2.D0*CI*2.D0*CI)
  Z=SRA
  S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
6  CONTINUE
  SNJ=S(NJ)
  REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
5  CONTINUE
  IF(ISICOI.NE.1) GOTO 21
7  CONTINUE
  H10=H1
  SINFI=(H1*XJ1-H10)/1.D0
  FI=ASIN(SINFI)
  COSFI=COS(FI)          ! DSQRT(1.D0-SINFI*SINFI)
  J=1
23 CONTINUE
  XJ1=X(J)
  IF(XJ1.GT.X1KON1.OR.XJ1.GT.X2KON1) GOTO 20
  I=1
  DL1=H10*XJ1*COSFI/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
  DL2=XJ1*COSFI*(1.D0-H10/(2.D0*H10+XJ1*SINFI))
  H21=H10+XJ1*SINFI
  R1=DSQRT(H10*H10+DL1*DL1)
  COSAL=H10/R1
  INPRED=INT((90.*3.14159D0/180.D0-ALF1)/(2.*FI))
  NPRED=INPRED+1
  IF(XJ1.LT.20.AND.SINFI.LT.0.02) NPRED=INT(NPRED/5)
  NJ=NPRED
  R2=(H10+X(J)*SINFI)/COSAL
  B(1)=K12
  SR=XJ1/(R1+R2)
  S(1)=B(1)*SR
  DO 22 I=2,NPRED
  CI=I
  H1N=H10*CI
  A5=1.D0
  IF(SINF1.LT.0.D0) A5=-1.D0
  H2N=H1N+X(J)*SINFI+A5*X(J)*COSFI*TAN((CI-1.)*FI)
  BN=X(J)*COSFI/COS((CI-1.)*FI)
  TGAL=(BN*COS((CI-1.)*FI)-A5*H2N*SIN(2.*(CI-1)*FI))/
  *(H1N+H2N*COS(2.*(CI-1)*FI)+A5*BN*SIN((CI-1.)*FI))
  B(I)=K12*B(I-1)
  R1I=H1N*(COS(ATAN(TGAL))+SIN(ATAN(TGAL))*TAN(ATAN(TGAL)+A5*
  *(CI-1.)*FI))
  R2I=H2N*COS((CI-1.)*FI)/COS(ATAN(TGAL+A5*(CI-1.)*FI))
  R3=R1I+R2I
  SRA=XJ1/R3
  Z=SRA
  S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
22 CONTINUE
  SNJ=S(NJ)
  REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
  J=J+1
  IF(J.GT.NS) GOTO 21
GOTO 23

```

20

```

CONTINUE
XJ1=X(J)
NPR=1
DL1=H10*XJ1*COSFI/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
DL2=XJ1*COSFI*(1.D0-H10/(2.D0*H10+XJ1*SINFI))
H21=H10+XJ1*SINFI
R1=DSQRT(H10*H10+DL1*DL1)
COSAL=H10/R1
ALF1=ACOS(COSAL)
R2=(H10+X(J)*SINFI)/COSAL      ! DSQRT(H21*H21+DL2*DL2)
XTO(1)=R1*SIN(ALF1-FI)
IXTO1=ABS(XTO(1))
BB=K12I(IXTO1)
RR=R1+R2
UOT(1)=BB/RR
S(1)=UOT(1)
DO 9 NPR=2,NJ                !
RO1=RO(1)
RO2=RO(2)
CI1=NPR
H1N=H10*CI1
A5=1.D0
IF(SINFI.LT.0.D0) A5=-1.D0
H2N=H1N+X(J)*SINFI+A5*X(J)*COSFI*TAN((CI1-1.)*FI)
BN=X(J)*COSFI/COS((CI1-1.)*FI)
TGAL=(BN*COS((CI1-1.)*FI)-A5*H2N*SIN(2.*(CI1-1.)*FI))/
*(H1N+H2N*COS(2.*(CI1-1.)*FI)+A5*BN*SIN((CI1-1.)*FI))
ALF1=ATAN(TGAL)
I=1
R1=H10/(COS(ALF1))
R2=R1*COS(ALF1-A5*FI)/COS(ALF1+A5*FI)
XTO(1)=R1*SIN(ALF1-A5*FI)
IXTOI=ABS(XTO(I))
BB=K12I(IXTOI)
RR=R1+R2
UOT(1)=BB/RR
I=I+1                ! I=2
CI=I
R3=R2*COS(ALF1)/COS(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI)
B1=R2*(SIN(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI)+COS(ALF1)*TAN(ALF1+A5*2.*FI))
XTO(2)=XTO(1)+B1*COS(FI)
R13=R3*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.-1.)*FI)/
*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)  ! R4
IXTO2=ABS(XTO(2))
BB=BB*K12I(IXTO2)
RR=RR+R3+R13
UOT(2)=BB/RR
IF((I+1).GT.NPR) GOTO 10
I=I+1                !      I=3
CI=I
R12=R13*COS(ALF1+A5*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+A5*2.*FI*(CI-2.))
B1=R13*(SIN(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)+COS(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)*
*TAN(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI))
XTO(3)=XTO(2)+B1*COS(FI)
R13=R12*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
*2.-1.)*FI)
IXTO3=ABS(XTO(3))
BB=BB*K12I(IXTO3)
RR=RR+R12+R13
UOT(3)=BB/RR
IF((I+1).GT.NPR) GOTO 10
DO 11 I=4,NPR
CI=I
R12=R13*COS(ALF1+A5*(CI-1.)*FI)/COS(ALF1+A5*2.*(CI-2.)*FI)
B1=R13*COS(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)*(TAN(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)+
*TAN(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI))
XTO(I)=XTO(I-1)+B1*COS(FI)
R13=R12*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+A5*((CI-1.)*
*2.-1.)*FI)

```

```

IXTOI=ABS(XTO(I))
BB=BB*K12I(IXTOI)
RR=RR+R12+R13
UOT(I)=BB/RR
11 CONTINUE
10 CONTINUE
S(NPR)=S(NPR-1)+UOT(NPR)
9 CONTINUE
PAUSE
1 CONTINUE
SNJ=S(NJ)
REST(J)=RO1*(1.D0+XJ1*2.D0*SNJ)
J=J+1
IF(J.GT.NS) GOTO 21
GOTO 20
21 CONTINUE
RETURN
END

```

Таблица 4.5.1 расчета значений ρ_k потенциал зондирования для двухслойного разреза, с наклонной геоэлектрической границей при горизонтальном градиенте посплошных величин ρ_1 и ρ_2

1. $H = 10$ м.; $H1XJ1 = 10.005$; $\sin\varphi = 0.005$; $KVORO1 = 5$;
 $KVRO2 = 5$; $I1KON(IN) = I2KON(IN) = 5$; 10; 20; 40; 100

J	X(j)	ρ_k					
		ρ_1 -исх $\rho_1=100$; $\rho_2=20$ без гориз. гради- ента	$\rho_1=100$; 99; 98; 97; 96; $\rho_2=20.0$; 20.01; 20.02 20.03 20.04	$\rho_1=100$ 99; 98; 97; 96; $\rho_2=20$ 20.25; 20.50 20.75 21.00	$\rho_1=100$ 95; 90 85 ;80 $\rho_2=20$ 21; 22; 23; 24	$\rho_1=100$ 90; 80 70 ;60 $\rho_2=20$ 22.5; 25; 27.5 30.0	$\rho_1=100$ 75; 50 25; 5 $\rho_2=20$ 25; 30; 35; 40
1	1.000	94.901	94.900	94.900	94.900	94.90	94.900
2	1.389	92.928	92.928	92.928	92.928	92.928	92.928
3	1.929	90.204	90.204	90.204	90.204	90.204	90.204
4	2.680	86.466	86.466	86.466	86.466	86.466	86.466
5	3.722	81.391	81.391	81.391	81.391	81.391	81.391
6	5.170	74.636	78.060	78.472	80.503	86.180	154.382
7	7.181	65.773	63.191	64.984	70.185	80.546	185.00
8	9.975	55.566	57.273	58.280	62.994	74.761	222.96
9	13.855	44.362	43.113	44.933	52.349	68.020	269.29
10	19.245	34.162	33.603	35.551	43.675	61.682	328.11
11	26.732	26.975	26.510	28.516	37.050	56.647	390.87
12	37.130	22.781	22.586	24.570	33.146	53.399	455.96
13	51.574	21.145	21.056	22.937	31.319	51.647	522.17
14	71.636	20.609	20.361	22.230	30.535	50.791	585.54
15	99.50	20.462	20.042	21.904	30.1693	50.371	462.90

J	X(j)	ρ_k					
		ρ_1 -исх $\rho_1=100$; $\rho_2=20$ без гориз. гради- ента	$\rho_1=100$; 100.01; 100.02 100.03; 100.04 $\rho_2=20.0$; 19.99; 19.98 19.97 19.96	$\rho_1=100$ 101;102 103;104 $\rho_2=20$ 19.75; 19.50 19.25 19.00	$\rho_1=100$ 105; 110 115; 120 $\rho_2=20$ 19; 18; 17; 16	$\rho_1=100$ 110;120 130; 140 $\rho_2=20$ 18.0;16 14; 12	$\rho_1=100$ 125; 150 175; 200 $\rho_2=20$ 15; 10; 5; 1
1	1.000	94.901	94.900	94.900	94.900	94.90	94.900
2	1.389	92.928	92.928	92.928	92.928	92.928	92.928
3	1.929	90.204	90.204	90.204	90.204	90.204	90.204
4	2.680	86.466	86.466	86.466	86.466	86.466	86.466
5	3.722	81.391	81.391	81.391	81.391	81.391	81.391
6	5.170	74.633	78.038	77.678	76.74	76.05	75.52
7	7.181	65.973	63.621	62.378	58.40	54.01	44.72
8	9.975	55.566	57.221	56.324	53.91	52.08	48.73
9	13.855	44.362	43.016	41.269	35.61	29.29	14.53
10	19.245	34.162	33.499	31.642	25.74	18.97	1.93
11	26.732	26.975	26.499	24.508	18.55	11.72	-7.26
12	37.130	22.781	26.404	20.620	14.84	8.22	-12.61
13	51.574	21.145	22.958	19.235	14.34	10.41	+15.53
14	71.636	20.609	20.262	18.543	13.57	9.30	15.75
15	99.50	20.462	19.945	18.230	13.23	8.73	16.70

2. $H_0 = 10$; $H1XJ1 = 10.005$; $\sin\varphi = 0.005$; $RVORO1 = 20$; $I1KON = 5$
; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50 ; 55 ; 60 ; 65 ; 70 ; 75 ; 80 ; 85 ; 90 ;
95 ; 100 ; $KVRO2 = 1$; $X2KON(10) = 100$; $RO21(IN) = 20$

J	X(j)	ρ_K						
		$\rho_1(IN)=$ 100;101;102; 103;104;105; 106;107;108; 109;110;112; 113;114;115; 116;117;118; 119;120; $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 120;119;118; 117;116;115; 114;113;112; 110;109;108; 107;106;105; 104;103;102; 101;100; $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 100;102;104; 106;108;110; 112;114;116; 120;122;124; 126;128;130; 132;134;136; 138; $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 138;136;134; 132;130;128; 126;124;122; 120;118;116; 114;112;110; 108;106;104; 102;100; $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 100;;99;98; 97; 96;95; 94; 93;92; 91;89;88; 87;86;85; 84;83;82; 81;80 $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 80;81;82; 83;84;85; 86;87;88; 89;91;92; 93;94;95; 96;9798; 99;100 $\rho_2=20$	$\rho_1(IN)=$ 100;95;9 0;85;80;7 5;70;60;5 5;50;45;4 0;35;30;2 0;15;10;5 $\rho_2=20$;
1	1.000	94.901	113.54	94.900	130.31	94.901	76.246	94.90
2	1.389	92.928	112.04	92.928	127.34	92.928	74.794	92.93
3	1.929	90.204	106.60	90.204	123.24	90.204	72.781	90.20
4	2.680	86.466	102.86	86.466	117.61	86.466	70.037	86.47
5	3.722	81.391	96.443	81.391	109.97	81.391	66.298	81.39
6	5.170	77.352	93.659	76.942	107.71	79.220	62.440	139.2
7	7.181	61.145	76.387	59.388	87.845	67.082	50.925	158.3
8	9.975	55.101	68.697	54.446	79.001	60.059	45.798	181.1
9	13.855	39.536	51.677	37.058	59.429	47.899	34.452	207.9
10	19.245	29.810	40.261	27.202	46.300	38.765	26.841	238.5.
11	26.732	22.650	31.748	20.002	36.511	31.860	21.166	269.4
12	37.130	18.808	27.040	16.261	31.096	29.906	18.026	298.9
13	51.574	17.611	25.208	15.455	28.990	26.164	16.806	325.5
14	71.636	16.912	24.374	14.722	28.030	25.428	16.249	349.1
15	99.50	16.598	23.994	14.393	27.593	25.087	15.995	366.1
15	99.50	$\rho_{K\text{ cp}}=20.296$		$\rho_{K\text{ cp}}=20.992$		$\rho_{K\text{ cp}}=20.541$		

3. $H_0 = 10$; $H1XJ1 = 10.005$; $\sin\varphi = 0.005$; $RVORO1 = 1$; $RO11(1) = 1000$;
 $X1KON(1) = 100$, $KVORO2 = 20$, $X2KON(20) = 5$; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 35 ;
40 ; 45 ; 50 ; 55 ; 60 ; 65 ; 70 ; 75 ; 80 ; 85 ; 90 ; 95 ; 100

J	X(j)	ρ_k						
		$\rho_2(IN)=$ 20;20.2;20.4; 20.6;20.8; 21;21.2;21.4. 21.6;21.8; 22;22.2; 22.4;22.6 22.8;23;23.2 23.4;23.6; 23.8; $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 23.8;23.6; 23.4;23.2; 23.0;22.8; 22.6;22.4; 22.2;22;21.8; 21.4;21.2;21; 20.8;20.6; 20.4;20.2; 20.0; $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 20;21;22;23; 24;25;26;27; 28;29;30;31; 32;33;34;35; 36;37;38; 39 $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 39;38;37;36; 35;34;33;32; 31;30;29;28; 27;26;25;24; 23;22;21;20 $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 20;19.8;19.6 19.4;19.2;19 18.8; 18.6; 18.4;18.2;18 17.8;17.6; 17.4;17.2;17 16.8;16.6; 16.4;16.2 $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 16.2;16.4; 16.6;16.8; 17; 17.2; 17.4;17.6; 17.8; 18;18.2 18.4;18.6; 18.8; 19.0; 19.2;19.4; 19.6; 19.8;20 $\rho_1=100$	$\rho_2(IN)=$ 20;25;30; 35;40;45; 50;55;60 65;70;75; 80;85;90; 100;105; 110;120 $\rho_1=100$
1	1.000	94.901	95.211	94.901	96.367	94.901	94.580	94.90
2	1.389	92.928	93.359	92.928	94.962	92.928	92.482	92.93
3	1.929	90.204	90.802	90.204	93.020	90.204	89.588	90.20
4	2.680	86.466	87.271	86.466	90.355	86.466	85.616	86.47
5	3.722	81.391	82.523	81.391	86.731	81.391	80.224	81.39
6	5.170	78.928	78.049	82.990	78.049	77.261	78.049	103.6
7	7.181	66.293	63.656	75.173	63.656	60.776	63.656	104.9
8	9.975	59.369	57.247	68.352	57.247	55.268	57.247	106.5
9	13.855	46.778	43.064	59.724	43.064	39.017	43.064	108.3
10	19.245	37.547	35.551	52.037	33.551	29.263	33.551	110.1.
11	26.732	30.587	26.457	46.062	26.457	22.098	26.457	111.7
12	37.130	26.632	22.533	42.384	22.533	18.271	22.533	112.9
13	51.574	24.924	21.087	40.532	21.007	17.143	21.007	113.8
14	71.636	24.200	20.312	39.687	20.312	16.440	20.311	114.3
15	99.50	23.865	19.994	39.284	19.994	16.124	19.994	114.6

Табличные данные позволяют определить диапазон отклонения удельных электрических сопротивлений, при которых кривая ρ_k сохраняет плавный закономерный характер, а средние значения ρ_k на последнем разnose стремятся к истинным удельным электрическим сопротивлениям второго слоя, если удельное сопротивление второго слоя остается неизменным, без горизонтального градиента.

4.6 Расчет методом многократных отражений двухслойных кривых η_k потенциал-зондирования при горизонтальном градиенте послойных величин ρ_1 , ρ_2 и η_1 , η_2

Счет кривых η_k потенциал-зондирования при горизонтальном градиенте послойных величин ρ_1 , ρ_2 и η_1 , η_2 в пределах разноса электродов АМ установки ВЭЗ-ВП (ИЛРП) может быть выполнен по программе WPDETA, построенной на основе программы VEZFDP и формулы (4.5.1). В программе WPDETA коэффициент отражения $K_{12}(x)^*$ становится индексированным по x в зависимости от переменных $\rho_1(x)$, $\rho_2(x)$ и $\eta_1(x)$, $\eta_2(x)$.

```

PROGRAM WPDETA      ! WP PO FI AND DELTA R PO GORIZONTALI
REAL X(24),H(1),H1XJ1,XJ
REAL(8) ETARP(24),ETA(2),ROZ(2),RESTZ(24),RO(2),REST(24)
REAL X1KON(50),X2KON(50),X1KON1,X2KON1
REAL(8) K12I(150),RO1(150),RO2(150),RO11(50),RO21(50)
REAL(8) ETA11(50),ETA21(50),ETA1(150),ETA2(150),K12IZ(150)
REAL(8) RO1Z(150),RO2Z(150)
INTEGER NS,NR,IKONRO  !!REG
!      NR - KOLICESTVO RAZNOSOV
!! PRINT*,'VVEDITE REG'
!! READ*,REG
! REG = 1  RASCET SPEKTRA
! REG = 2      RASCET 2 -X SLOYINIX KRIVIX
PRINT*,'VVEDITE NS'    ! NS - KOL-VO SLOEV
READ*,NS
PRINT*,'VVEDITE RO(I)' ! RO(I) - UDEL. R SLOEV
READ*,(RO(I),I=1,NS)
PRINT*,'VVEDITE ETA(I)' ! в procentax

READ*,(ETA(I),I=1,NS)
PRINT*,'VVEDITE H(I)'  ! MOCNOSTI SLOEV
READ*,(H(I),I=1,(NS-1))
DO 7 I=1,NS
ROZ(I)=RO(I)/(1.D0-ETA(I)*0.01D0)
7 CONTINUE
PRINT*,'VVEDITE NR'    ! KOLICESTVO RAZNOSOV
READ*,NR
656 X(1)=1.0
Q=1.389
DO 703 I=2,NR
X(I)=X(I-1)*Q
703 CONTINUE

```

```

XJ=X(NR)
PRINT*, 'VVEDITE IKONRO'
READ*, IKONRO
PRINT*, 'VVEDITE KVORO1'           ! KVOETA1=KVORO1
READ*, KVORO1
PRINT*, 'VVEDITE RO11(IN)'
READ*, (RO11(IN), IN=1, KVORO1)
PRINT*, 'VVEDITE ETA11(IN)'
READ*, (ETA11(IN), IN=1, KVORO1)
PRINT*, 'VVEDITE X1KON(IN)'
READ*, (X1KON(IN), IN=1, KVORO1)
X1KON1=X1KON(1)
DO 1 IN=1, KVORO1
I=1
3 CONTINUE
IF(I.LE.(ABS(X1KON(IN)))) RO1(I)=RO11(IN)
IF(I.LE.(ABS(X1KON(IN)))) ETA1(I)=ETA11(IN)
IF(I.GT.(ABS(X1KON(IN)))) GOTO 1
I=I+1
GOTO 3
1 CONTINUE
PRINT*, 'VVDITE KVORO2'           !KVOETA2=KVORO2
READ*, KVORO2
PRINT*, 'VVEDITE RO21(IN)'
READ*, (RO21(IN), IN=1, KVORO2)
PRINT*, 'VVEDITE ETA21(IN)'
READ*, (ETA21(IN), IN=1, KVORO2)
PRINT*, 'VVEDITE X2KON(IN)'
READ*, (X2KON(IN), IN=1, KVORO2)
X2KON1=X2KON(1)
DO 2 IN=1, KVORO2
I=1
4 CONTINUE
I2X2K=ABS(X2KON(IN))
IF(I.LE.I2X2K) RO2(I)=RO21(IN)
IF(I.LE.I2X2K) ETA2(I)=ETA21(IN)
IF(I.GT.I2X2K) GOTO 2
I=I+1
GOTO 4
2 CONTINUE
DO 6 I=1, IKONRO
RO1Z(I)=RO1(I)/(1.D0-ETA1(I)*0.01D0)
RO2Z(I)=RO2(I)/(1.D0-ETA2(I)*0.01D0)
6 CONTINUE
DO 5 I=1, IKONRO
K12I(I)=(RO2(I)-RO1(I))/(RO2(I)+RO1(I))

```

```

K12IZ(I)=(RO2Z(I)-RO1Z(I))/(RO2Z(I)+RO1Z(I))
5 CONTINUE
!!! IF(REG.EQ.1) GOTO 708
PRINT*,'VVEDITE H1XJ1'
READ*,H1XJ1
!!! PRINT*,'VVEDITE ISICOI'
!!! READ*,ISICOI
!!! 1 - RASCET UGLOV; 2 - RASCET GORISONT.
CALL KGMI(NS,NR,H,RO,X,REST,H1XJ1,K12I,X1KON1,X2KON1)
CALL KGMI(NS,NR,H,ROZ,X,RESTZ,H1XJ1,K12IZ,X1KON1,X2KON1)
PRINT*,'VIVOD X(I)'
PRINT 707,(X(I),I=1,NR)
707 FORMAT(5X, 'X( )=',F8.4)
PAUSE
PRINT*,'VIVOD REST(I)'
PRINT 705,(REST(I),I=1,NR)
705 FORMAT(5X, 'REST( )=',E16.10)
PAUSE
PRINT*,'VIVOD RESTZ(I)'
PRINT 7016,(RESTZ(I),I=1,NR)
7016 FORMAT(5X, 'RESTZ( )=',E16.10)
PAUSE
DO 7017 I=1,NR
ETARP(I)=(RESTZ(I)-REST(I))/RESTZ(I)*100.D0
7017 CONTINUE
PRINT*,'VIVOD ETARP(I)'
PRINT 7015,(ETARP(I),I=1,NR)
7015 FORMAT(5X, 'ETARP( )=',E16.10)
PAUSE
STOP
END
SUBROUTINE KGMI(NN,NS,H,RO,X,REST,H1XJ1,K12I,X1KON1,
*X2KON1)
REAL H(1),X(24),CI,H1XJ1,H10,H21,XJ1,H1,CI1
REAL(8) UOT(50),XTO(50),K12I(150),B1,R1,R2,R12,R13,RO(2),REST(24)
REAL(8) K12,SNJ,B(4200),S(4200),SR,SRA,Z,A5,BB,ALF1
REAL(8) SINFI,FI,DL1,DL2,COSFI,TGAL,R3,BN,H1N,H2N,COSAL
REAL(8) RR,R1I,R2I
REAL X1KON1,X2KON1
INTEGER NN,NS,NPRED
NN=2
! NN - KOL-VO SLOEV
! NS - KOL-VO RAZNOSOV
RO1=RO(1)
RO2=RO(2)
K12=(RO(2)-RO(1))/(RO(2)+RO(1))

```

```

H1=H(1)
  H10=H1
  SINFI=(H1XJ1-H10)/1.D0
  FI=ASIN(SINFI)
  COSFI=COS(FI)          ! DSQRT(1.D0-SINFI*SINFI)
  J=1
23  CONTINUE
  XJ1=X(J)
  IF(XJ1.GT.X1KON1.OR.XJ1.GT.X2KON1) GOTO 20
  I=1
  DL1=H10*XJ1*COSFI/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
  DL2=XJ1*COSFI*(1.D0-H10)/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
  H21=H10+XJ1*SINFI
  R1=DSQRT(H10*H10+DL1*DL1)
  COSAL=H10/R1
  INPRED=INT((90.*3.14159D0/180.D0-ALF1)/(2.*FI))
  NPRED=INPRED+1
  IF(XJ1.LT.20.AND.SINF1.LT.0.02) NPRED=INT(NPRED/5)
  NJ=NPRED
  R2=(H10+X(J)*SINFI)/COSAL
  B(1)=K12
  SR=XJ1/(R1+R2)
  S(1)=B(1)*SR
  DO 22 I=2,NPRED
  CI=I
  H1N=H10*CI
  A5=1.D0
  IF(SINF1.LT.0.D0) A5=-1.D0
  H2N=H1N+X(J)*SINFI+A5*X(J)*COSFI*TAN((CI-1.)*FI)
  BN=X(J)*COSFI/COS((CI-1.)*FI)
  TGAL=(BN*COS((CI-1.)*FI)-A5*H2N*SIN(2.*(CI-1)*FI))/
*(H1N+H2N*COS(2.*(CI-1.)*FI)+A5*BN*SIN((CI-1.)*FI))
  B(I)=K12*B(I-1)
  R1I=H1N*(COS(ATAN(TGAL))+SIN(ATAN(TGAL))*TAN(ATAN(TGAL)+A5*
*(CI-1.)*FI))
  R2I=H2N*COS((CI-1.)*FI)/COS(ATAN(TGAL)+A5*(CI-1.)*FI)
  R3=R1I+R2I
  SRA=XJ1/R3
  Z=SRA
  S(I)=Z*B(I)+S(I-1)
22  CONTINUE
  SNJ=S(NJ)
  REST(J)=RO1*(1.D0+2.D0*SNJ)
  J=J+1
  IF(J.GT.NS) GOTO 21
GOTO 23

```

```

20    CONTINUE
      XJ1=X(J)
      NPR=1
      DL1=H10*XJ1*COSFI/(2.D0*H10+XJ1*SINFI)
      DL2=XJ1*COSFI*(1.D0-H10/(2.D0*H10+XJ1*SINFI))
      H21=H10+XJ1*SINFI
      R1=DSQRT(H10*H10+DL1*DL1)
      COSAL=H10/R1
      ALF1=ACOS(COSAL)
      R2=(H10+X(J)*SINFI)/COSAL      ! DSQRT(H21*H21+DL2*DL2)
      XTO(1)=R1*SIN(ALF1-FI)
      IXTO1=ABS(XTO(1))
      BB=K12I(IXTO1)
      RR=R1+R2
      UOT(1)=BB/RR
      S(1)=UOT(1)
      DO 9 NPR=2,NJ                      !
      RO1=RO(1)
      RO2=RO(2)
      CI1=NPR
      H1N=H10*CI1
      A5=1.D0
      IF(SINFI.LT.0.D0) A5=-1.D0
      H2N=H1N+X(J)*SINFI+A5*X(J)*COSFI*TAN((CI1-1.)*FI)
      BN=X(J)*COSFI/COS((CI1-1.)*FI)
      TGAL=(BN*COS((CI1-1.)*FI)-A5*H2N*SIN(2.*(CI1-1.)*FI)/
      *(H1N+H2N*COS(2.*(CI1-1.)*FI)+A5*BN*SIN((CI1-1.)*FI))
      ALF1=ATAN(TGAL)
      I=1
      R1=H10/(COS(ALF1))
      R2=R1*COS(ALF1-A5*FI)/COS(ALF1+A5*FI)
      XTO(1)=R1*SIN(ALF1-A5*FI)
      IXTOI=ABS(XTO(I))
      BB=K12I(IXTOI)
      RR=R1+R2
      UOT(1)=BB/RR
      I=I+1                      ! I=2
      CI=I
      R3=R2*COS(ALF1)/COS(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI)
      B1=R2*(SIN(ALF1)+A5*COS(ALF1)*TAN(ALF1+A5*2.*FI))
      XTO(2)=XTO(1)+B1*COS(FI)
      R13=R3*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.-1.)*FI)/
      *COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)      ! R4
      IXTO2=ABS(XTO(2))
      BB=BB*K12I(IXTO2)
      RR=RR+R3+R13

```

```

UOT(2)=BB/RR
IF((I+1).GT.NPR) GOTO 10
I=I+1                !        I=3
CI=I
R12=R13*COS(ALF1+A5*FI*(CI-1.))/COS(ALF1+A5*2.*FI*(CI-2.))
B1=R13*(SIN(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)+COS(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)*
*TAN(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI))
XTO(3)=XTO(2)+B1*COS(FI)
R13=R12*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+((CI-1.)*
*2.-1.)*FI)
IXTO3=ABS(XTO(3))
BB=BB*K12I(IXTO3)
RR=RR+R12+R13
UOT(3)=BB/RR
IF((I+1).GT.NPR) GOTO 10
DO 11 I=4,NPR
CI=I
R12=R13*COS(ALF1+A5*(CI-1.)*FI)/COS(ALF1+A5*2.*(CI-2.)*FI)
B1=R13*COS(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)*(TAN(ALF1+A5*(CI-2.)*2.*FI)+
*TAN(ALF1+A5*(CI-1.)*2.*FI))
XTO(I)=XTO(I-1)+B1*COS(FI)
R13=R12*COS(ALF1+A5*((CI-1.)*2.+1.)*FI)/COS(ALF1+A5*((CI-1.)*
*2.-1.)*FI)
IXTOI=ABS(XTO(I))
BB=BB*K12I(IXTOI)
RR=RR+R12+R13
UOT(I)=BB/RR
11  CONTINUE
10  CONTINUE
S(NPR)=S(NPR-1)+UOT(NPR)
9   CONTINUE
1   CONTINUE
SNJ=S(NJ)
REST(J)=RO1*(1.D0+XJ1*2.D0*SNJ)
J=J+1
IF(J.GT.NS)    GOTO 21
GOTO 20
21  CONTINUE
RETURN
END

```

Выполненные автором расчеты позволяют отметить, что отклонение двухслойных кривых ρ_k потенциал-зондирования от исходной кривой ρ_k , (не осложненной

горизонтальным градиентом $\rho_1(x)$ и $\rho_2(x)$ в большей мере определяется значением $\rho_2(x)$ на конечном разnose. Так при $\rho_2(99.5) = 21$ Ом $\rho_k(99.5) = 21.9$ Ом. При $\rho_2(99.5) = 24$ Ом -3) $\rho_k(99.5) = 30.2$ Ом; при $\rho_2(99.5) = 30$ Ом $\rho_k(99.5) = 50.4$ Ом. При $\rho_1(99.5) = 5$ Ом и $\rho_2(99.5) = 40$ Ом $\rho_k(99.5) = 643$ Ом становится исключительно высоким (643 Ом).

Двухслойных кривых η_k потенциал-зондирования более подвержены влиянию горизонтального градиента значений $\rho_1(x)$, $\rho_2(x)$ и $\eta_1(x)$, $\eta_2(x)$. Поэтому не исключено, что наблюдаемые выскоки на полевых кривых $\eta_k(x)$ ВЭЗ-ВП (или ВЭЗ-ВП(ИЛРП)) в отдельных случаях обусловлены именно горизонтальным градиентом послойных величин ρ_i и η_i .

Глава 5. О методах решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ

5. 1. Развитие алгоритмов решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ

Решение обратных задач электроразведки методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП) на ЭВМ непосредственно связано с решением прямой задачи и совершенствовалось параллельно с развитием методов расчета многослойных кривых ВЭЗ [2, 9, 19, 20, 20, 35, 55, 60, 61, 69] и ВЭЗ-ВП [10, 15, 16, 20, 52]. Если интерпретация кривых ВЭЗ при хорошей палеточной основе [22, 47] начала выполняться с помощью ЭВМ в 1972 г. [21], то первые программы интерпретации кривых ВЭЗ-ВП были разработаны только в 1978 [53] – 1979 [15] годах. До этого времени интерпретация кривых ВЭЗ-ВП выполнялась различными эмпирическими способами [25, 35, 36, 37, 68], подробно рассмотренными автором в 1981 году [40].

Решение обратной задачи ВЭЗ и ВЭЗ-ВП с помощью ЭВМ и персональных компьютеров состоит в сравнении измеренных (наблюденных) кривых ρ_k^n и η_k^n [15,53] или их трансформант $\Delta R_n(m)$ [53] с рядом теоретических кривых ρ_k^T , η_k^T и $\Delta R_T(m)$. Оно включает расчет теоретических кривых кажущегося сопротивления (ρ_k^T), кажущейся поляризуемости (η_k^T) и минимизацию с заданной точностью расхождений измеренных (ρ_k^n , η_k^n , $\Delta R_n(m)$) и теоретических (ρ_k^T , η_k^T , $\Delta R_T(m)$) значений. Эффективность минимизации как по ρ_k , так и по η_k зависит, во-первых, от того насколько "нулевые приближения" близки к значениям искомых параметров и, во-вторых, непосредственно от способа минимизации величин отклонений наблюдаемых значений ρ_k^n и η_k^n от изменяемых теоретических (ρ_k^T , η_k^T). При интерпретации кривых ВЭЗ-ВП работа с программами Л.В.Егоровой и А.А.Рыжова допускала визуальное, беспалеточное определение "нулевых приближений". Такое задание

"нулевых приближений" вынудило Л.В.Егорову применять двухэтапную минимизацию (грубую по дискретным точкам и точную методом сопряженных градиентов), а А.А.Рыжову воспользоваться методом вращающихся координат. Насколько эффективен этот, последний алгоритм [53], можно судить по тому, что при его проверке автором 40 % от общего количества решенных автором задач остановлено по числу заданных итерационных испытаний (150 - 200), не достигнув требуемой величины относительной дисперсии. Причины неудовлетворительного решения - низкая точность "нулевых приближений" и ошибки в определении соответствия выделенных двухслойных элементов наблюдаемых кривых ρ_k и η_k [42]. Повторное, палеточное, определение "нулевых приближений" позволило довести решение всех задач до их удовлетворительного завершения. Это является хорошим аргументом необходимости палеточной подготовки "нулевых приближений".

5. 2. Основы палеточных методов решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ

5. 2. 1. О связи координат эквивалентных точек кривых η_k и ρ_k

Анализ наблюдаемых и теоретических кривых ВЭЗ-ВП показал, что каждому из четырех типов кривых ρ_k - Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$), А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) могут соответствовать четыре типа кривых η_k : Н_{ВП} ($\eta_1 > \eta_2 < \eta_3$), Q_{ВП} ($\eta_1 > \eta_2 > \eta_3$), А_{ВП} ($\eta_1 < \eta_2 < \eta_3$), К_{ВП} ($\eta_1 < \eta_2 > \eta_3$). Форма каждой кривой η_k зависит как от η_1, η_2, η_3 , так и от ρ_1, ρ_2, ρ_3 . Этот очевидный факт был положен в основу систематизации трехслойных кривых η_k и исследований по определению координат эквивалентных точек по поляризуемости и построению вспомогательных палеток ВЭЗ-ВП.

На первом этапе исследований было сделано предположение, что если характер кривой η_k зависит от величин $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ и $\mu_2 = \rho_3 / \rho_1$, то координаты эквивалентных точек поляризуемости должны быть закономерно связаны с известными в теории электроразведки координатами эквивалентных точек кривых ρ_k . Далее, в соответствии с выражением

$$\rho_i^* = \rho_i / (1 - \eta_i), \quad (5.2.1)$$

было определено, что связь между их ординатами в зависимости от типа кривых ρ_k может быть выражена следующими формулами:

$$\eta_{[H]} = 1 - \frac{\rho_{[H]}}{\rho_{[H]}^*}; \quad (5.2.2) \quad \eta_{[Q]} = 1 - \frac{\rho_{[Q]}}{\rho_{[Q]}^*}; \quad (5.2.3) \quad \eta_{[A]} = 1 - \frac{\rho_{[A]}}{\rho_{[A]}^*}; \quad (5.2.4) \quad \eta_{[K]} = 1 - \frac{\rho_{[K]}}{\rho_{[K]}^*}, \quad (5.2.5)$$

где $\rho_{[H]}$, $\rho_{[Q]}$, $\rho_{[A]}$, $\rho_{[K]}$ и $\rho_{[H]}^*$, $\rho_{[Q]}^*$, $\rho_{[A]}^*$, $\rho_{[K]}^*$ - соответственно ординаты эквивалентных точек кривых ρ_k и ρ_k^* ; $\eta_{[H]}$, $\eta_{[Q]}$, $\eta_{[A]}$, $\eta_{[K]}$ - ординаты эквивалентных точек трехслойных кривых поляризуемости, соответствующие кривым ρ_k типов H, Q, A, K.

Исходными формулами для расчета ординат эквивалентных точек поляризуемости явились известные в теории электроразведки формулы ординат эквивалентных точек сопротивления [23] и среднего удельного сопротивления и поляризуемости вдоль (ρ_t, η_t) и поперек (ρ_n, η_n) слоев по В.А.Комарову [26]:

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2}; \quad (5.2.6) \quad \rho_n = \frac{\rho_1^* h_1 - \rho_2^* h_2}{h_1 + h_2}; \quad (5.2.7)$$

$$\eta_t = \frac{\rho_t^* - \rho_t}{\rho_t^*} = \frac{\eta_1 + \eta_2^* \frac{h_2}{h_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}}{1 + \frac{h_2}{h_1} \frac{\rho_1}{\rho_2}}; \quad (5.2.8)$$

$$\eta_n = \frac{\rho_n^* - \rho_n}{\rho_n^*} = \frac{\eta_1 + \eta_2^* \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \frac{h_2}{h_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}}{1 + \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \frac{h_2}{h_1} \frac{\rho_2}{\rho_1}}. \quad (5.2.9)$$

Для трехслойных кривых η_t , соответствующих кривым ρ_k типа H, согласно (5.2.2), (5.2.6), (5.2.8)

$$\eta_{[H]} = \frac{\eta_1 + \eta_2^* \frac{v_1}{\mu_1}}{1 + \frac{v_1}{\mu_1}} = \frac{\eta_1^* \left(1 - c_1 \frac{v_1}{\mu_1} \right)}{1 + \frac{v_1}{\mu_1}}, \quad (5.2.10)$$

где $c_1 = \eta_2 / \eta_1$, $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$, $v_1 = h_2 / h_1$.

Для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа Q, согласно (5.2.3)

$$\eta_{[Q]} = I - \frac{b^*}{b} * \left(I - \eta_1 * \frac{I + \frac{v_1}{\mu_1} * c_1}{I + \frac{v_1}{\mu_1}} \right). \quad (5.2.11)$$

Значения b и b^* определены из зависимости этих коэффициентов от величин $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$, $\mu_1^* = \rho_2^* / \rho_1^*$ и $v_1 = h_2 / h_1$ по составленной автором на основе вспомогательных палеток LCH и LCQ [49] номограмме [39].

Для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа А, согласно (5.2.4) получено

$$\eta_{[A]} = I - \left\{ \left[\frac{I + v_1 * \mu_1}{I + v_1 / \mu_1} * (I - \eta_1) + \frac{v_1}{\mu_1} * (I - c_1 * \eta_1) \right] / \left(\frac{I}{I - \eta_1} + \frac{v_1 * \mu_1}{I - c_1 * \eta_1} \right) \right\}^{1/2}. \quad (5.2.12)$$

Для трехслойных кривых η_k , соответствующим кривым ρ_k типа К, в соответствии с формулой (5.2.5) и условием $\rho_{[K]} = \rho_{[A]}$ по [23]

$$\eta_{[K]} = \eta_{[A]}. \quad (5.2.13)$$

Абсциссы эквивалентных точек, определенные по известным [23] формулам эквивалентных точек Н, Q, А, К кривых ВЭЗ и установленному [23] закону смещения точек Н, Q, А, К при изменении удельного сопротивления второго слоя, имели следующие выражения :

а) для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа Н,

$$X_{(\eta[H])} = X_{[H]} = h_1 + h_2, \quad (5.2.14)$$

где $X_{[H]}$ - абсцисса точки Н кривой ρ_k ;

б) для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа Q,

$$X_{(\eta[Q])} = X_{[Q]}^* = \frac{I}{b^*} * (h_1 + h_2) = \frac{I}{b^*} * X_{[H]}, \quad (5.2.15)$$

где $X_{[Q]}^*$ - абсцисса точки Q кривой ρ_k^* ;

в) для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа А,

$$X_{(\eta[A])} = h_1 * \left\{ \left[I - \eta_1 + \frac{v_1}{\mu_1} * (I - c_1 * \eta_1) \right] * \left(\frac{I}{I - \eta_1} + \frac{v_1 * \mu_1}{I - c_1 * \eta_1} \right) \right\}^{1/2} \quad (5.2.16)$$

г) для трехслойных кривых η_k , соответствующих кривым ρ_k типа К,

$$X_{(\eta[K])} = X_{[K]}^*, \quad (5.2.17)$$

где $X_{[K]}^*$ - абсцисс точки К кривой ρ_K^* .

Экспериментальная проверка полученных таким образом координат эквивалентных точек поляризуемости, путем совмещения двухслойных кривых η_K с нижней (правой) ветвью трехслойных кривых η_K , подтвердила правильность выбранного направления исследований. При этом удовлетворительные результаты были получены для расчетных координат $\eta_{[H]}$, $X_{(\eta_{[H]})}$ и $\eta_{[Q]}$, $X_{(\eta_{[Q]})}$. Наряду с этим было установлено, что расчетные координаты $\eta_{[A]}$, $X_{(\eta_{[A]})}$ и $\eta_{[K]}$, $X_{(\eta_{[K]})}$ не удовлетворяют необходимости хорошего совмещения двухслойных кривых η_K с нижней (правой) ветвью трехслойных кривых η_K . Последующий эмпирический поиск координат $\eta_{[A]}$, $X_{(\eta_{[A]})}$ и $\eta_{[K]}$, $X_{(\eta_{[K]})}$ привел к некоторому уточнению координат точек К и А кривых ρ_K .

Лучшее совмещение двухслойных кривых η_K с нижней (правой) ветвью трехслойных кривых η_K , соответствующих кривым ρ_K типа А, (рис. 5.2.1) получено при ординатах, близких к расчетным по формуле продольного эквивалентного сопротивления [39]. Для кривых η_K , соответствующих кривым ρ_K типа К хорошее совпадение (рис. 5.2.2) наблюдалось при расположении креста соответствующей двухслойной кривой в эквивалентных точках, определенных по формуле поперечного эквивалентного сопротивления (5.2.7). Выбор соответствующей двухслойной кривой η_K производился по модулю μ_1 , определенному выражением

$$\mu_1^* = \frac{\rho_3^*}{\rho_3^*} = \frac{\rho_3^*}{(\rho_1^* \cdot h_1 + \rho_2^* \cdot h_2) / (h_1 + h_2)} = \frac{\rho_3^* (1 + \nu_1)}{(1 + c_2 \cdot \eta_1) \cdot \left(\frac{1}{1 - \eta_1} - \frac{\mu_1^* \cdot \nu_1}{1 - c_1 \cdot \nu_1} \right)} \quad (5.2.18)$$

Полученные результаты по определению эквивалентных точек поляризуемости кривых η_K , соответствующих кривым ρ_K типа К - не случайны. Они согласуются с выводами Е.Н.Каленова [23], А.И.Заборовского [17] о распределении тока в разрезе типа К поперек напластования пород.

Здесь отметим также то, что графическая интерпретация многослойных кривых ρ_K с помощью ранее определенных координат Н, Q, А, К [23] неоднократно требовала их уточнения, особенно по координатам точки К [23,32,35,49]. Значительные погрешности наблюдались также при использовании палеточных координат точек А [23]. Наиболее ранними исследованиями по определению координат точки К является работа М.Мартена

[32]. С незначительной корректурой координаты точки К, полученные М.Мартеном, были приняты Е.Н.Каленовым и Б.К.Матвеевым, а А.М.Пылаев сместил точку К по линии S_{1-2} от точки Н на величину, определяемую по номограмме в зависимости от значений v_1 и μ_1 .

Автором, в соответствии с полученными результатами исследований и предположением о наличии функциональной связи между значениями η_k и ρ_k , ординаты точки К (кривых ρ_k) предложено определять по формуле

$$\rho_{[k]} = p * \frac{I + v_1 * \mu_1}{I + v_1} \quad (5.2.19)$$

При графическом определении абсциссы точки К (по наилучшему совмещению двухслойной кривой ρ_k с нижней ветвью трехслойных кривых ρ_k) на основе формулы (5.2.19) построена вспомогательная палетка ВЭП-К (рис. 5.2.3). В работе [41] приведена также уточненная автором вспомогательная палетка ВЭП-А для определения координат точки А кривых ρ_k . Эти палетки - ВЭП-К и ВЭП-А, с обновленными координатами точек А и К, вошли в составленные в 1981 г. на кафедре геофизики Геологического факультета МГУ номограммы-палетки для ускоренной интерпретации кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП [59].

В процессе проведенных исследований было также установлено, что наиболее совершенными для графической интерпретации на основе эквивалентных точек, являются трансформированные кривые $\psi_k = \eta_k / (1 - \eta_k)$, дающие более точное (по сравнению с кривыми η_k) совмещение двухслойных кривых с нижней (правой) ветвью трехслойных.

5.2.2. О введении параметра поляризационной восприимчивости

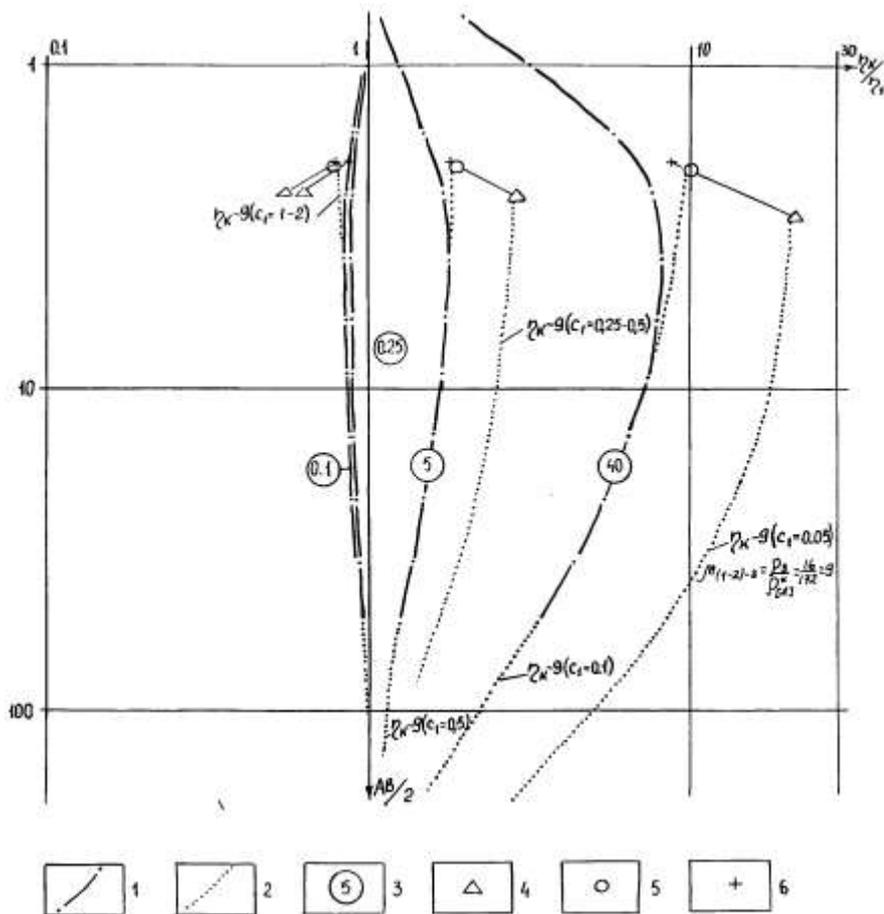
(ψ) и его связи с коэффициентом поляризуемости (η)

При работах методом вызванной поляризации (ВП) результаты наблюдений принято выражать коэффициентом кажущейся поляризуемости [25]

$$\eta_k = \frac{\Delta U_{en}}{\Delta U} \quad (\text{или } \eta_k = \frac{\Delta U_{en}}{\Delta U} * 100 \%),$$

где ΔU - разность потенциалов между приемными электродами в конечный момент зарядки (или разность потенциалов при пропускании постоянного тока), $\Delta U_{ВП}$ - разность потенциалов между теми же электродами в начальный или в любой последующий момент после выключения тока (обычно через 0.5 - 1 сек.). Отсюда

$$\Delta U_{en} = \eta_k * \Delta U. \quad (5.2.20)$$



[66].

Рис. 5.2.1. Трехслойные теоретические кривые η_k , соответствующие кривым ρ_k типа А ($\mu_1 = 4$; ($\mu_2 = \mu_1^2$; $\nu_1 = 1$)) и их совмещение с двухслойными кривыми η_k , проведенными от расчетов на основе формул ВЭЗ или произвольно выбранных (по наилучшей сходимости) координат эквивалентных точек поляризуемости ($\eta_{[A]}$).

1 - трехслойные теоретические кривые η_k ; 2 - двухслойные кривые η_k ; 3 - шифр трехслойных кривых η_k ($5-c_1 = \eta_2 / \eta_1$); 4 - расчетные координаты эквивалентных точек поляризуемости, соответствующие кривым ρ_k типа А; 5 - координаты эквивалентных точек поляризуемости, определенные по наилучшей сходимости двухслойных и трехслойных кривых; 6 - координаты эквивалентных точек поляризуемости, сосчитанные на основе формул продольной проводимости.

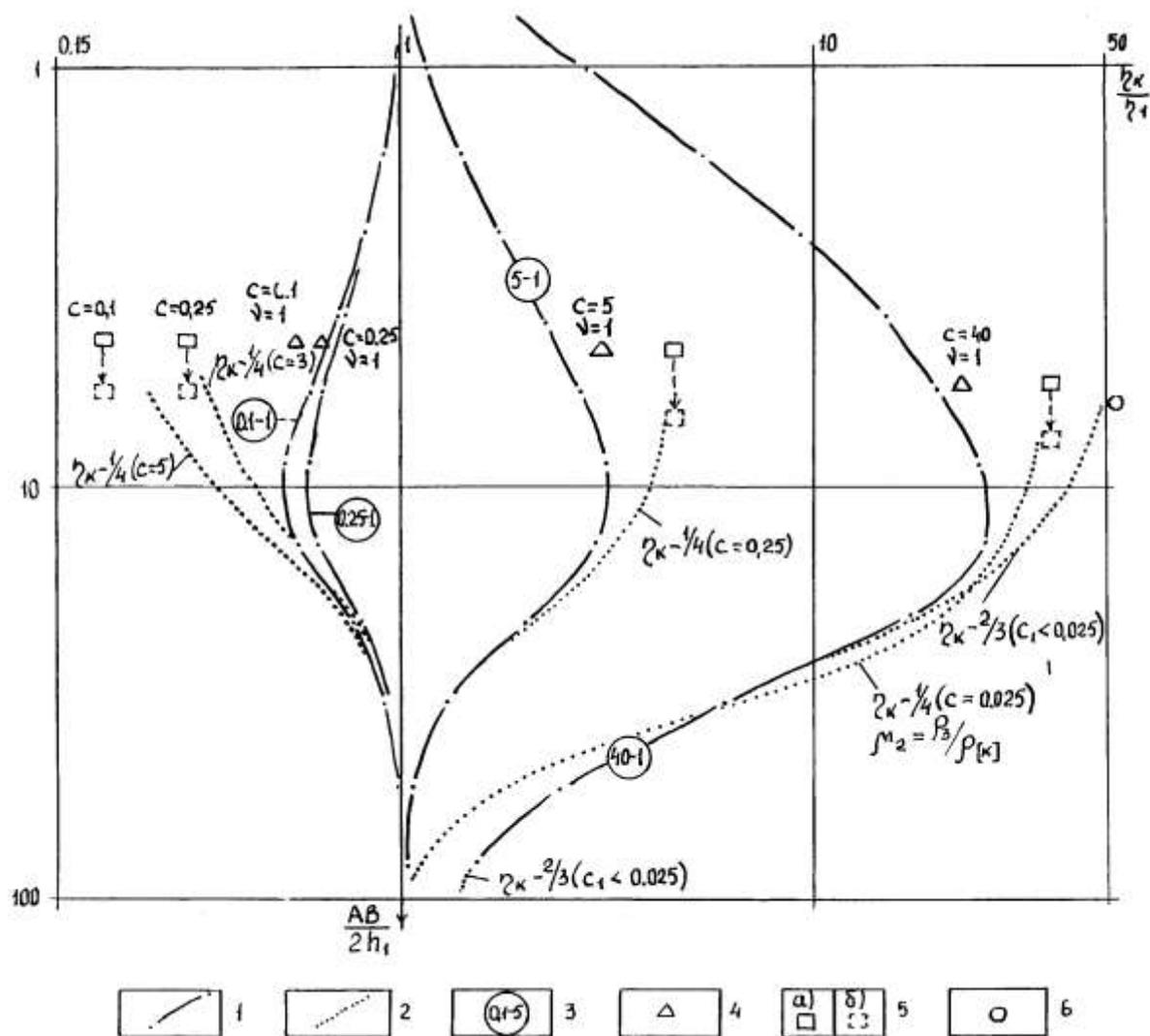


Рис. 5.2.2. Трехслойные теоретические кривые η_{κ} , соответствующие кривым ρ_{κ} типа К ($\mu_1 = 9$; $\mu_2 = \rho_3 / \rho_1 = 1$) и совмещение с двухслойными кривыми η_{κ} , проведенными от произвольно выбранных (по наилучшей сходимости) или сосчитанных на основе формул поперечной проводимости координат эквивалентных точек поляризуемости

1, 2 – трехслойные (1) и двухслойные (2) кривые η_{κ} ; 3 – шифр трехслойных кривых ($0.1-c_1 = \eta_2 / \eta_1$); 4, 5, 6 – координаты эквивалентных точек поляризуемости, полученные расчетно на основе формул точки К ВЭЗ по Е.Н.Каленову (4), сосчитанные на основе формул поперечной проводимости (5а) и смещенные параллельно оси абсцисс до наилучшего совмещения двух- и трехслойных кривых η_{κ} (5б), найденные произвольно по наилучшей сходимости двух- и трехслойных кривых η_{κ} (6).

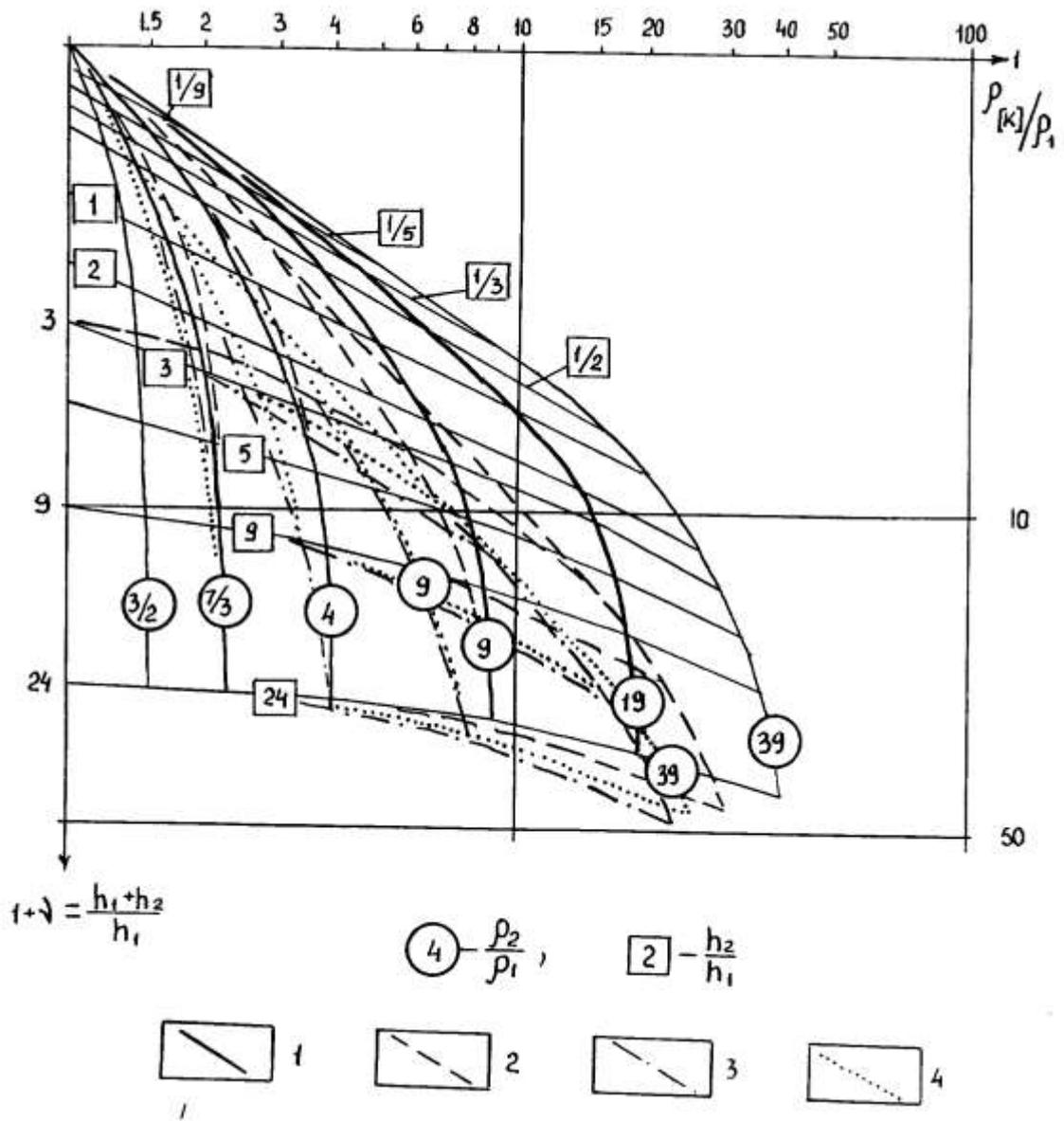


Рис. 5.2.3. Вспомогательная палетка ВЭП-К для определения координат точек К кривых ρ_k

- 1 – линии координат точки К по палетке ВЭП-К ;
- 2 – координаты точек К по А.М.Пылаеву ;
- 3 - координаты точек К по Е.Н.Каленову ;
- 4 - координаты точек К по Б.К.Матвееву .

Принимая ΔU_0 как разность потенциалов в начале зарядки

$$\Delta U_0 = \Delta U - \Delta U_{en} \quad (5.2.21)$$

можно получить [25]

$$\Delta U_{en} = \frac{\eta_k}{1 - \eta_k} * \Delta U_0. \quad (5.2.22)$$

Обозначив

$$\frac{\eta_k}{1 - \eta_k} = \psi_k, \quad (5.2.23)$$

получим

$$\Delta U_{en} = \psi_k * \Delta U_0. \quad (5.2.24)$$

Следовательно, величина

$$\psi_k = \frac{\Delta U_{en}}{\Delta U_0} \quad (5.2.25)$$

выражает отношение разности потенциалов между приемными электродами после выключения тока к разности потенциалов в момент включения тока. Отметим, что величина ψ_k может быть представлена формулами :

$$\psi_k = \frac{\Delta U - \Delta U_0}{\Delta U_0}; \quad (5.2.26)$$

$$\psi_k = \frac{\frac{\rho_k^* * I}{K} - \frac{\rho_k * I}{K}}{\frac{\rho_k * I}{K}}, \quad (5.2.27)$$

где ρ_k^* и ρ_k - кажущееся удельное сопротивление при наличии ЭДС-ВП (ρ_k^*) и без нее (ρ_k), I - сила тока, K - коэффициент установки ВЭЗ-ВП. В соответствии с формулами (5.2.26), (5.2.27)

$$\psi_k = \frac{\rho_k^*}{\rho_k} - 1. \quad (5.2.28)$$

Отсюда

$$\rho_k^* = \rho_k * (1 + \psi_k) = \rho_k + \rho_k^* * \psi_k. \quad (5.2.29)$$

Согласно формуле (5.2.21) разность потенциалов поля в конечный момент зарядки и его напряженность (вблизи приемных электродов) будут равны:

$$\Delta U = \Delta U_0 + \psi_k * \Delta U_0 = \Delta U_0 * (1 + \psi_k); \quad (5.2.30)$$

$$E = E_0 + \psi_k * E_0 = E_0 * (1 + \psi_k), \quad (5.2.31)$$

где E_0 и E - напряженность поля в начальный и конечный момент зарядки. На основании формального сходства формул (5.2.30) и (5.2.31) с выражением электрического смещения в диэлектриках [13] величина $\psi_k = \eta_k / (1 - \eta_k)$ названа [39] кажущейся **поляризационной восприимчивостью**.

Следует подчеркнуть, что согласно формуле (5.2.29) между ρ_k^* ($\Delta U_{вп}$) и ψ_k существует линейная зависимость (рис. 5.2.4); для зависимости ρ_k^* ($\Delta U_{вп}$) и η_k функциональная связь более сложная

$$\rho_k^* = \frac{\rho_k}{1 - \eta_k} = \rho_k + \rho_k * \frac{\eta_k}{1 - \eta_k}. \quad (5.2.32)$$

Поэтому величина ψ_k более закономерно меняется (по сравнению с η_k) и удобнее для теоретических исследований и палеточной интерпретации.

Легко увидеть, что при $\eta_k < 5\%$ $\eta_k = \psi_k$. Соответственно при исследовании осадочных образований с ионной проводимостью, для которых $< 5\%$, кривые η_k (АВ/2) и ψ_k (АВ/2) практически совпадают.

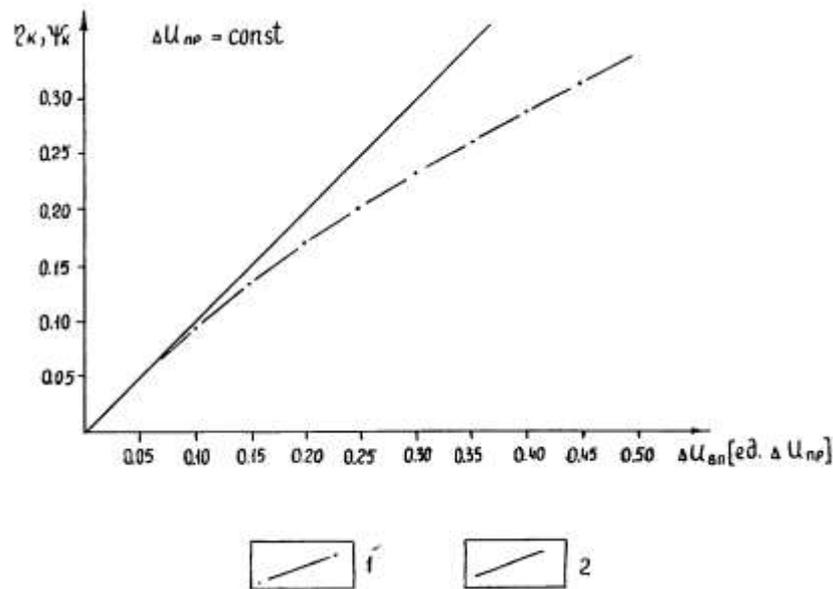


Рис. 5.2.4. График зависимости величин η_k (1) и ψ_k (2) от $\Delta U_{вп}$ при $\Delta U_{пр} = \text{const}$

5.2.3. Об эквивалентности кривых поляризуемости η_k и палетках ВЭЗ-ВП

Построение палеток ВЭЗ-ВП. Анализ материалов по определению эквивалентных точек поляризуемости (η_k) или поляризационной восприимчивости (ψ_k) позволил построить вспомогательные палетки поляризационной восприимчивости - ψ , а также двухслойные и трёхслойные палетки ψ_k . Расчет двухслойных и трёхслойных кривых $\psi_k = \eta_k / (1 - \eta_k)$ выполнен при $\psi_1 = 0.01$ (1%) - средней величине поляризационной восприимчивости рыхлых осадочных отложений.

Двухслойные палетки поляризационной восприимчивости (ψ_k) построены [39] на основе палеток η_k , приведенных в работе [27], с использованием при их трансформации формулы (5.2.23). При этом верхняя часть всех кривых ($r/h = 0.7 - 4.0$) была проверена и уточнена автором. Кроме того, трансформированные палетки ψ_k были дополнены двухслойными кривыми с модулем $\psi_2 / \psi_1 = 0.025; 0.050$. Счёт палеточных кривых проведён на ЭЦВМ-МИР-1 в 1974 г. [38] по программе составленной автором на основе формул степенного ряда [44].

Двухслойные палетки поляризационной восприимчивости. В приложениях к работе [39] двухслойные палетки поляризационной восприимчивости составлены на основе [27], по принципу построения двухслойной " ρ_2 " палетки ВЭЗ А.М.Пылаева [49], для определенных в работе [27] соотношений параметров η_2 / η_1 . Каждая из тринадцати двухслойных палеток NN 1 - 13 [39] соответствует одному из следующих значений $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$: 1/39; 1/19; 1/9; 1/4; 3/7; 2/3; 1; 3/2; 7/3; 4; 9; 19; 39. Величина μ_1 указывается в шифре двухслойной палетки " ψ_2 " - μ_1 . Шифр каждой кривой двухслойной палетки - величина $e_1 = \psi_2 / \psi_1$ (ψ_2 и ψ_1 - поляризационная восприимчивость второго и первого слоев).

Вспомогательные палетки поляризационной восприимчивости. Эти палетки построены на основе определенных теоретически и экспериментально координат эквивалентных точек поляризационной восприимчивости. Ординаты эквивалентных точек поляризационной восприимчивости в соответствии с формулами (5.2.6), (5.2.7), (5.2.23), (5.2.28) и результатами проведенных автором исследований имеют следующие выражения:

$$\psi_{[H]} = \frac{I + \frac{\nu_1}{\mu_1}}{\frac{I}{1 + \psi_1} + \frac{\nu_1}{\mu_1} * \left(\frac{I}{1 + e_1 * \psi_1} \right)} - I ; \quad (5.2.33)$$

$$\psi_{[Q]} = \frac{b}{b^*} * \frac{1 + \frac{v_1}{\mu_1}}{\frac{1}{1 + \psi_1} + \frac{v_1}{\mu_1} * \left(\frac{1}{1 + e_1 * \psi_1} \right)} - 1 ; \quad (5.2.34)$$

$$\psi_{[A]} = \frac{1 + v_1 / \mu_1}{\frac{1}{1 + \psi_1} + \frac{v_1}{\mu_1} * \left(\frac{1}{1 + e_1 * \psi_1} \right)} - 1 ; \quad (5.2.35)$$

$$\psi_{[K]} = \psi_1 * \frac{1 + v_1 * \mu_1 * e_1}{1 + v_1 * \mu_1} . \quad (5.2.36)$$

где $\psi_{[H]}$, $\psi_{[Q]}$, $\psi_{[A]}$, $\psi_{[K]}$ - ординаты эквивалентных точек трёхслойных кривых поляризационной восприимчивости, соответствующих кривым ρ_k типов Н , Q , А , К .

Абсциссы эквивалентных точек кривых ψ_k определены следующим образом:

$$X_{(\psi[H])} = h_1 * (1 + v_1) ; \quad (5.2.37)$$

$$X_{(\psi[Q])} = \frac{h_1}{b^*} * (1 + v_1) ; \quad (5.2.38)$$

$$X_{(\psi[A])} = h_1 * (1 + v_1) ; \quad (5.2.39)$$

$$X_{(\psi[K])} = \varepsilon^* * w * h_1 * (1 + v_1) \quad (5.2.40)$$

В приведенных выше формулах

$$b^* = \begin{cases} 1 + (1 - \mu_1^*) * 0.422 / v_1^{0.738} , & \text{если } v_1 \geq 1.62 \\ 1 + (1 - \mu_1^*) * 0.222 * v_1^{0.658} , & \text{если } v_1 < 1.62 \text{ и } \mu_1 \geq 0.25 \\ 1 + (1.053 - \lg \mu_1^*) * 0.117 * v_1^{0.765} , & \text{если } v_1 < 1.62 \end{cases} \quad (5.2.41)$$

$$\varepsilon^* = \left[\frac{(1 + v_1 * \mu_1^*) * \left(1 + \frac{v_1}{\mu_1^*} \right)}{(1 + v_1)^2} \right] (0.609 + z^*) \quad (5.2.42)$$

$$\mu_1^* = \mu_1 \cdot \frac{1 + e \cdot \psi_1}{1 + \psi_1}, \quad W = \frac{1.15 \cdot \mu_1 m^{0.1154}}{(1.086 \cdot \mu_1^{0.0478})^{\lg v_1}}, \quad (5.2.43)$$

$$z = 1.0 / (0.8792 \cdot \mu_1^* - 0.9568). \quad (5.2.44)$$

Общий шифр вспомогательных палеток ВЭЗ-ВП NN° 14 - 35 [39] – " $\psi_{[H]} - \mu_1$ "; " $\psi_{[Q]} - \mu_1$ "; " $\psi_{[A]} - \mu_1$ "; " $\psi_{[K]} - \mu_1$ " характеризует, какому типу кривых соответствует вспомогательная палетка ВЭЗ-ВП и для какой величины $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ она составлена. Шифр отдельных линий на вспомогательных палетках - отношения $e_1 = \psi_2 / \psi_1$.

Вспомогательные палетки ВЭЗ-ВП, соответствующие кривым ρ_k типа Н (" $\psi_{[H]} \dots$ "), Q (" $\psi_{[Q]} \dots$ "), А (" $\psi_{[A]} \dots$ "), составлены для значений $\psi_1 = 0.001$ (0.1 %) /сплошные линии на палетках/ и $\psi_1 = 0.01$ (1 %) /длинные пунктирные линии/. Расхождение между линиями координат эквивалентных точек, полученными для $\psi_1 = 0.001$ и $\psi_1 = 0.01$, начинает проявляться только при значениях $e_1 = \psi_2 / \psi_1 \geq 20$. По оси ординат на вспомогательных палетках ВЭЗ-ВП отложены отношения $\psi_{[H]} / \psi_1$, $\psi_{[Q]} / \psi_1$, $\psi_{[A]} / \psi_1$, $\psi_{[K]} / \psi_1$; по оси абсцисс - отношения $X_{(\psi_2)} / h_1$:

$$X_{(\psi_{[H]})} / h_1; X_{(\psi_{[Q]})} / h_1; X_{(\psi_{[A]})} / h_1; X_{(\psi_{[K]})} / h_1.$$

На палетках проведены линии $v_1 = h_2 / h_1$ и шкала величин $1 + v_1 = (h_1 + h_2) / h_1$. В целях повышения точности интерпретации кривых ψ_k на вспомогательных палетках ВЭЗ-ВП проведены также линии равных значений $v_1 \cdot e_1 = (h_2 / h_1) \cdot (\psi_2 / \psi_1)$ - для кривых типа Q_{ВП} и K_{ВП} и $v_1 / e_1 = (h_2 / h_1) \cdot (\psi_1 / \psi_2)$ - для кривых типа H_{ВП} и A_{ВП}. Эта эквивалентность для трёхслойных кривых по поляризуемости установлена автором. Предлагаемые параметры - $v_1 \cdot e_1$ и v_1 / e_1 являются аналогами поперечного сопротивления и продольной проводимости. Они условно могут быть определены как продольная (v_1 / e_1) и поперечная ($v_1 \cdot e_1$) поляризуемости.

Трёхслойные палетки поляризационной восприимчивости. Эти палетки под NN° 36 - 107 приведены в [42]. Они составлены по принципу трёхслойных палеток А.М.Пылаева [49], т.е. сгруппированы на основе координат эквивалентных точек поляризационной восприимчивости. Их количество составляет - 72 шт. Общий шифр палеток :

$$\begin{aligned} \psi - H - \frac{\mu_1}{\mu_2} - \frac{e_1}{e_2}; & \quad \psi - Q - \frac{\mu_1}{\mu_2} - \frac{e_1}{e_2}; \\ \psi - A - \frac{\mu_1}{\mu_2} - \frac{e_1}{e_2}; & \quad \psi - K - \frac{\mu_1}{\mu_2} - \frac{e_1}{e_2}; \end{aligned}$$

указывает на соответствие трехслойной кривой ψ_k определенному типу трехслойной кривой ρ_k (Н, Q, А, К), с заданными величинами $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ и $\mu_2 = \rho_3 / \rho_1$. В шифре приводятся также данные о значениях $e_1 = \psi_2 / \psi_1$ и $e_2 = \psi_3 / \psi_1$, для которых составлены палетки. На палетках проведены линии h_1 (мощности первого слоя) и $h_1 + h_2$ (суммарной мощности первого и второго слоя). Шифр каждой отдельной теоретической кривой ψ_k определяет принятую при расчете величину $v_1 = h_2 / h_1$.

Приведенные в [42] трёхслойные палетки ψ_k составлены для $\psi_3 = \psi_1$ при широком диапазоне изменения мощности второго слоя ($h_2 / h_1 = 0.1 - 24$), удельных сопротивлений второго и третьего слоев ($\rho_2 / \rho_1 = 1/9 - 9$; $\rho_3 / \rho_1 = [1/9] - 81$) и поляризационной восприимчивости второго слоя ($\psi_2 / \psi_1 = 0.1 - 66$).

Об эквивалентности трёхслойных кривых ВЭЗ-ВП. При полевых наблюдениях ВЭЗ-ВП одним и тем же кривым η_k могут соответствовать различные соотношения параметров ρ_i , η_i , h_i геоэлектрического разреза. Самым простым для изучения эквивалентности кривых ВЭЗ-ВП (η_k или ψ_k) является трёхслойный разрез. При исследовании эквивалентности кривых поляризуемости ограничимся начальным моментом спада $\Delta U_{вп}$ и общепринятым вычислением η_k по ρ_i (без ЭДС-ВП).

В целом трёхслойные кривые ψ_k (или η_k) отличаются значительно меньшим проявлением эквивалентности по сравнению с трёхслойными кривыми ρ_k . При достаточно точном определении параметра h_1 эквивалентность по поляризуемости чаще всего наблюдается только при $v_1 = h_2 / h_1 < 0.5$. Если определение h_1 по кривым ρ_k выполнено с большой погрешностью (что возможно при интерпретации многослойных кривых с плохими левыми асимптотами) может проявиться графическая эквивалентность по поляризуемости со смещённой точкой h_1 . Этот вид эквивалентности может наблюдаться даже при $v_1 = 3 - 5$.

Эмпирический анализ различных типов кривых ψ_k позволил автору найти следующие выражения, определяющие связь параметров трёхслойного геоэлектрического разреза для эквивалентных кривых ψ_k :

1. Для трёхслойных кривых ψ_k , соответствующих кривым ρ_k типов Н и А :

а) при $\eta_2 < \eta_1$:

$$\frac{v_1'}{\mu_1' * e_1'} = \frac{v_1''}{\mu_1'' * e_1''}; \quad (5.2.45)$$

б) при $\eta_2 < \eta_1$:

$$\frac{v_1' * e_1'}{\mu_1'} = \frac{v_1'' * e_1''}{\mu_1''}. \quad (5.2.46)$$

2. Для трёхслойных кривых ψ_k , соответствующих кривым ρ_k типов Q и К :

а) при $\eta_2 < \eta_1$:

$$\frac{v_1' * \mu_1'}{e_1'} = \frac{v_1'' * \mu_1''}{e_1''}; \quad (5.2.47)$$

б) при $\eta_2 < \eta_1$:

$$v_1' * \mu_1' e_1' = v_1'' * \mu_1'' e_1'' \quad (5.2.48)$$

Здесь $v_1' = h_2' / h_1'$, $\mu_1' = \rho_2' / \rho_1'$, $e_1' = \psi_2' / \psi_1'$, и $v_1'' = h_2'' / h_1''$, $\mu_1'' = \rho_2'' / \rho_1''$, $e_1'' = \psi_2'' / \psi_1''$ - параметры соответственно первого и второго геоэлектрического разреза, над которыми получают одинаковые кривые η_k (или ψ_k). Соблюдение тождеств (5.2.45) - (5.2.48) зависит от точности графического совмещения. Их справедливость проверена на эквивалентных кривых поляризуемости первого типа - с совмещенными точками h_1 .

Графическое построение кривых ВЭЗ-ВП на основе эквивалентных точек. Как было отмечено выше, при беспалеточном определении "нулевых приближений" искомым параметров до 40 % задач ВЭЗ-ВП, решаемых по алгоритму А.А.Рыжова [53], остановлено по числу заданных итераций, не достигнув требуемой величины относительной дисперсии. При повторном, палеточном, определении "нулевых приближений" все задачи были доведены до удовлетворительного решения.

Для работы с палетками ВЭЗ-ВП [44] необходим некоторый навык, который можно приобрести как в процессе подготовки "нулевых приближений" по параметрам h_i , ρ_i , η_i , так и при учебном графическом построении кривых ВЭЗ-ВП на основе предложенных автором эквивалентных точек. Т.е., при наличии различных программ решения прямой задачи на ЭВМ, графическое построение кривых ВЭЗ-ВП является исключительно учебным, дающим понятие о разрешающей способности палеточной и компьютерной интерпретации ВЭЗ-ВП и необходимые знания для палеточной интерпретации ВЭЗ-ВП (подготовке "нулевых приближений" параметров геоэлектрического разреза).

Принцип построений кривых ВЭЗ-ВП такой же, как и графическое построение многослойных кривых ρ_k -ВЭЗ [58]. Подробно это описано в работе [59].

5. 3. Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП с помощью палеток поляризационной восприимчивости

Палеточная интерпретация многослойных кривых ВЭЗ-ВП выполняется с помощью двухслойных и вспомогательных палеток поляризационной восприимчивости, предложенных автором в 1979 г. [39]. Выбор палеток поляризационной восприимчивости определяется соотношением удельных сопротивлений слоев геоэлектрического разреза. Поэтому в начале по двухслойным, трехслойным палеткам А.М.Пылаева [49] и

вспомогательным палеткам LCH, LCQ [48] и ВЭП-А, ВЭП-К [39] интерпретируют кривые ρ_k . К интерпретации кривых ψ_k (или η_k) можно переходить только после завершения интерпретации кривых ρ_k в целом по профилю или даже площади участка и построения разреза по удельным электрическим сопротивлениям.

Интерпретация многослойных кривых поляризуемости с помощью двухслойных и вспомогательных палеток NN^o 1 - 35 [39] ВЭЗ-ВП определяется полученными при интерпретации кривых ρ_k величинами отношений : $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$; $\mu_2 = \rho_3 / \rho_{\varepsilon 1}$; $\mu_3 = \rho_4 / \rho_{\varepsilon 2}$; $\mu_{n-1} = \rho_n / \rho_{\varepsilon(n-2)}$, где n - количество слоев разреза; $\rho_{\varepsilon 1}$ - эквивалентное сопротивление первого и второго слоев; $\rho_{\varepsilon 2}$ - эквивалентное сопротивление первых трех слоев; $\rho_{\varepsilon(n-2)}$ - эквивалентное сопротивление (n - 1) слоев. Интерпретация кривых ψ_k (или $\eta_k = \psi_k$ при $\eta_k < 5$ %) с помощью двухслойных и вспомогательных палеток ψ_k выполняется в той же последовательности, что и интерпретация кривых ρ_k [23].

Процесс интерпретации может быть заметно ускорен и упрощен при применении **ускоренного метода интерпретации кривых ρ_k и η_k ВЭЗ-ВП**, основанного на использовании шести номограмм-палеток [59]. Он имеет как самостоятельное значение, а также может быть использован в качестве вспомогательного при экспрессном определении "нулевых приближений" параметров разреза при решении обратной задачи ВЭЗ-ВП с использованием компьютера. Ценность предложенного метода интерпретации состоит не только в простоте (вместо множества листов палеток нужны только шесть) и достаточно высокой точности обработки многослойных кривых ВЭЗ-ВП, но и в возможности совместной интерпретации кривых ρ_k и ψ_k . Применение этого метода повышает надежность и информативность электроразведки ВЭЗ и ВЭЗ-ВП.

Приведенные в работе [59] две номограмм-палетки для ускоренной интерпретации кривых ρ_k уточнены по сравнению с номограмм-палетками, приведенными в работе [49], путем замены вспомогательных палеток LCK и LCQ А.М.Пылаева [49] на более точные - ВЭП-К и ВЭП-А, составленные автором.

Глава 6. Интерпретация кривых ВЭЗ-ИЛРП и ВЭЗ-ВП (ИЛРП)

при суммарном угле наклона геоэлектрической границы
и дневного рельефа не более 5 – 8 градусов

6.1. Интерпретация кривых ВЭЗ-ИЛРП

Приведенные в работе [43] кривые ρ_k потенциал-зондирования ВЭЗ-ИЛРП, полученные при углах наклона геоэлектрической границы до 5-8°, позволяют отметить, что

они в пределах погрешности полевых наблюдений отклоняются от соответствующих кривых ρ_k потенциал-зондирования для горизонтально-слоистых сред. Следовательно, интерпретация кривых ρ_k потенциал-зондирования, как и двух других кривых ВЭЗ-ИЛРП, с какой-то долей погрешности, может выполняться разработанными методами для горизонтально-слоистых сред. Углы наклона геоэлектрической границы будут определяться по разности глубин до соответствующих границ в каждой последующей точке размещения электрода А.

В пределах действия принципа эквивалентности точность палеточных и компьютерных способов интерпретации кривых ρ_k -ВЭЗ определяется точностью палеточного и компьютерного совмещения наблюдаемых и теоретических кривых ρ_k . Как было отмечено выше, коэффициенты фильтра Е.Ш.Абрамовой позволяют выполнять расчет кривых ρ_k (град.-зонд.; потенц.-зонд.; производных по $S_k(x)$) с исключительно высокой точностью. Проблема в точности наблюдения полевых кривых ρ_k (град.-зонд.; потенц.-зонд.; производ.по $S_k(x)$), сложности геоэлектрического разреза и в технологии получения увязанных графиков $S_k(x)$ - основы последующих вычислений трех кривых ρ_k ВЭЗ-ИЛРП. Главной при этом является точность определения поправки по увязанным встречным лучевым графикам $S_k(x)$ и U/I (приведенного к 1 Амперу). Для повышения точности полевых наблюдений целесообразно ввести систему 2 - 3-ех (и более) кратных дублирующих измерений. При геолого-экономической целесообразности автором рекомендуется система встречных, увязанных и, по возможности, многократно перекрытых лучевых графиков $S_k(x)$ (U/i). Главное - это будет способствовать повышению точности определения поправки за нуль ϵ_0 - в нисходящие от точки А графики U/I . Весьма существенным при этом является увеличение плотности информации по полученным на основе исправленных (за ϵ_0) графиков $S_k(x)$ геоэлектрическим разрезам $S_k(x) = f(AM)$, $U/I = f(AM)$, ρ_k (потенц.-зонд.; град.зонд.; производной по $S_k(x)$). Качественный анализ этих данных позволит разделить наблюдаемый профиль ВЭЗ-ИЛРП на участки различной достоверности количественной и геолого-геофизической интерпретации кривых ρ_k (град.-зонд.; потенц.-зонд.; производной по $S_k(x)$).

Интерпретация геоэлектрического разреза по трем кривым ВЭЗ-ИЛРП - ρ_k град. -зонд., ρ_k потен.-зонд., ρ_k производ. по $S_k(x)$ повышает точность и достоверность определения послонных величин ρ_i и h_i . Ввод "нулевых приближений" по параметрам глубин (h_i) и удельных электрических сопротивлений (ρ_i) задается на основе их палеточных расчетов по кривой ρ_k -град.-зонд.(ВЭЗ), описанным в главе 5.

Составленная автором программа VEZRP2 (текст которой по договору можно запросить у автора) решения обратной задачи ВЭЗ-ИЛРП по трем кривым ρ_k (град.-зонд.; потенц.-зонд.; производных по $S_k(x)$) включает главную программу и пять подпрограмм. Главная программа определяет три режима ее работы :

- 1) REG = 1 - решение прямой задачи подпрограммой CARCA, полным аналогом программы VEZLUC ;
- 2) REG = 2 - решение обратной задачи по трем кривым ВЭЗ-ИЛРП, на основе заданных значений ρ_k , снятых с полевых-расчетных кривых с шагом 1.389 (семь точек на декаду), с расчетом теоретических кривых подпрограммой CARCA на основе коэффициентов фильтра Абрамовой (15-ти для ρ_k град.-зонд; 20-ти для ρ_k потенц.-зондирования) ; минимизацией погрешности по кривым ρ_k град.-зонд. и ρ_k потенц.-зонд. методом быстрейшего спуска [29]; минимизацией погрешности по кривым ρ_k производных по $S_k(x)$ методами дискретных точек [15,21], методом разностных отношений ($\Delta f / \Delta x$) и параболической интерполяции по трем точкам;
- 3) REG = 3 - решение обратной задачи по трем кривым ИЛРП-ВЭЗ по заданному в программе тесту для пятислойного разреза.

Минимизация кривых ρ_k производных по $S_k(x)$ методом дискретных точек ,с первичным разбиением интервала неопределенности на 5 отрезков (на основе чисел Фибоначчи).

Алгоритм минимизации методом разностных отношений (аналога метода производных по ρ_k) построен в соответствии с [29], с заменой частных производных ρ_{kj} по ρ_i отношением разностей ρ_{kj} и ρ_i , соответствующих двум последним смежным шагам минимизации по дискретным точкам на всех разностях $x(j)$. Величину поправки для каждого искомого параметра (ρ_i) при этом определяет выражение:

$$\rho_{Kj} - \text{испр.} = \rho_k - \text{предш.} + \frac{1 / N_j * \sum_{j=1}^{Nj} [(\rho_{Kj-T2} - \rho_{Kj0}) / \rho_{Kj0}]}{- 2 / Nj * \sum_{j=1}^{Nj} \{[(\rho_{Kj-T2} - \rho_{Kj0}) / \rho_{Kj0}] * \partial f_j / \partial \rho_i\}} . \quad (6.1.1)$$

Определив на основе (6.1.1) и двух последних смежных дискретных точек третью точку, переходим к минимизации методом параболической интерполяции.

Алгоритм минимизации методом параболической интерполяции по трем точкам составлен автором на основе известного [24] выражения параболы в общем виде

$$y = (x - m)^2 + b , \quad (6.1.2)$$

с минимумом параболы в точке $[m ; b]$. О том , что параболическая интерполяция функции при поиске минимума может оказаться более успешной при завершении работ методом наискорейшего спуска , отмечено в работе [28] . По исходной системе формул для трех точек:

$$b = y_1 - (x_1 - m)^2 ; \quad b = y_2 - (x_2 - m)^2 ; \quad b = y_3 - (x_3 - m)^2 \quad (6.1.3)$$

найдем величину поправки

$$m = [(y_3 - y_1) * (x_2^2 - x_1^2) - (y_2 - y_1) * (x_3^2 - x_1^2)] / \{ 2 * [(x_2 - x_1) * (y_3 - y_1) - (x_3 - x_1) * (y_2 - y_1)] \}. \quad (6.1.4)$$

Согласно О.Куфуду в результате независимого решения обратной задачи по каждой отдельной кривой ρ_k град.-зонд. или ρ_k потенц.-зонд. (от равных " нулевых приближений " параметров) в соответствии с правилами эквивалентности по Майе [31] :

- 1) по поперечному сопротивлению $h_u * \rho_i$ - при удельном сопротивлении рассматриваемого слоя меньшем удельного сопротивления подстилающего слоя ;
- 2) по продольной проводимости h_u / ρ_i - при удельном сопротивлении рассматриваемого слоя большем удельного сопротивления подстилающего слоя ;

мы получаем один из вариантов эквивалентных решений. Направляя решение в свободный поиск минимума независимо по двум кривым ρ_k град.-зонд. и ρ_k потенц.-зонд. мы повышаем вероятность приближения полученных осредненных параметров к истинным.

Сопоставление данных минимизации теоретических кривых ρ_k град.-зонд., потенц.-зонд., производных по $S_k(x)$ от произвольных и палеточных "нулевых приближений" параметров слоев (ρ_i , h_i) показало, что наилучшими по точности решения одного из эквивалентных вариантов и приближению к искомым параметрам являются решения, полученные с использованием дополнительной информации по кривым ρ_k производным по $S_k(x)$. Нисходящая асимптота кривой ρ_k производной по $S_k(x)$ является более протяженной по сравнению с нисходящей асимптотой кривой ρ_k град.-зонд. По ней более уверенно определяется удельное электрическое сопротивление последнего слоя, а в отдельных случаях и суммарная мощность разреза (по кресту двухслойной палетки ρ_k производной по $S_k(x)$)

6.2 Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП (ИЛРП)

Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП (ИЛРП) выполняется по программе WP1 (текст которой по договору можно запросить у автора), построенной на основе программы VEZRP2. Как и в программе VEZRP2 решение обратной задачи ВЭЗ-ВП (ИЛРП)

выполняется по трем кривым ρ_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$) и трем кривым η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$). Она включает главную программу и пять подпрограмм, Решение прямых задач и минимизация величины отклонения теоретических и наблюдаемых кривых ρ_k и η_k выполняется согласно принятым в программе VEZRP2 решениям. При этом минимизация величины отклонения теоретических кривых η_k от наблюдаемых выполняется как по кривым ρ_k^* , включающих влияние послонных величин удельной поляризуемости (5.2.1), так и непосредственно по кривым η_k .

Расчет теоретических и интерпретация наблюдаемых (или тестовых) кривых η_k с помощью программы WP1 включает в себя четыре этапа:

1-ый этап. Задание исходных данных:

- 1)- Ввода режима: REG = 1 – решение прямой задачи по трем кривым η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$); REG = 2 – решение обратной задачи по трем наблюдаемым кривым η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$); REG = 3 – решение обратной задачи по тесту с тремя кривыми η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$);
- 2)- Ввода параметра IPROD: 1 – интерпретация кривых η_k , производных по $S_k(x)$ с помощью подпрограммы KUF3 от искомым величин удельной поляризуемости, полученных в результате интерпретации кривых η_k градиент-зондирования; потенциал-зондирования с помощью подпрограмм KUF и KUF2; 2 - интерпретация кривых η_k , производных по $S_k(x)$ с помощью подпрограммы KUF3 от заданых “нулевых приближений” послонных величин удельной поляризуемости;
- 3)- Ввода параметра NEKON – количества итераций;
- 4)- Ввода трех кривых η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$) при REG = 2;
- 5)- Задание количества слоев – KSLOEV;
- б)- Задание послонных величин удельных сопротивлений и мощностей слоев, полученных по программе VEZRP2.

2-ой этап. Расчет значений ρ_k^* по величинам удельных электрических сопротивлений, полученных в результате счета по программе VEZRP2, (ρ_i) и введенным “нулевым приближениям” послонных величин удельной поляризуемости (η_i): $\rho_i^* = \rho_i / (1 - \eta_i * 0.01)$

3-ий этап. Расчет значений ρ_k (градиент-зондирования (REST (J)); потенциал-зондирования (RESP (J)); производных по $S_k(x)$ (RKPG (J))) по величинам удельных

сопротивлений и мощностей слоев, полученных в результате счета по программе VEZRP2 и значений ρ_{k0}^* , получаемых на основе этих значений кривых ρ_k и трех интерпретируемых (наблюденных) кривых η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$).

4-ый этап. Расчет соответствующих теоретических кривых ρ_k^* и η_k (градиент-зондирования; потенциал-зондирования; производных по $S_k(x)$).

5-ый этап. Минимизация отклонений наблюдаенно-расчетных и теоретических кривых ρ_k^* с помощью подпрограмм KUF, KUF2, KUF3, при закрепленных послойных величинах удельных электрических сопротивлений и мощностей слоев.

6-ой этап. Параболическая минимизация отклонений наблюдаенно-расчетных и теоретических кривых η_k при закрепленных послойных величинах удельной электрической поляризуемости и изменяемых в пределах эквивалентности величинах удельных электрических сопротивлений и мощностей слоев.

7-ой этап. Завершающая повторная минимизация отклонений наблюдаенно-расчетных и теоретических кривых ρ_k^* с помощью подпрограмм KUF, KUF2, KUF3, при закрепленных послойных величинах удельных электрических сопротивлений и мощностей слоев, полученных в результате работы 6-го этапа.

Полученные автором результаты параболической минимизации по трем точкам по каждой из трех кривых η_k (градиент-зонд.; потенциал-зонд. и производ. по $S_k(x)$) от исключительно далеких “нулевых приближений”, за 3 – 5 шагов, позволяют рекомендовать внедрение этого метода минимизации.

Глава 7. Геологическая интерпретация результатов малоуглубинной электроразведки методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач

7.1. О комплексе задач, решаемых методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП

Применение методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях позволяет решать следующие задачи [11, 64] :

- 1) расчленение и корреляция геологического разреза;
- 2) выявление зон выветривания трещиноватых и закарстованных пород по кровле коренных, скальных образований;

- 3) исследование грунтов при гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных исследованиях, с определением глинистости, пористости, влажности, засоленности почв и коэффициентов фильтрации подстилающих грунтов;
- 4) оценка коррозионной активности грунтов по отношению к стали и др.

Для расчленения и корреляции геологического разреза наиболее эффективным, с учетом стоимости работ, является метод ВЭЗ. Проведение работ по предложенному автором способу ВЭЗ-ИЛРП значительно повысит геологическую результативность метода ВЭЗ за счет уменьшения в два раза интервала осреднения разреза, выполнения интерпретации по трем кривым ρ_k (град.-зонд.; потенц.-зонд.; производной по $S_k(x)$), улучшения корреляции по геоэлектрическим разрезам U_x^n (приведенных к 1 Амперу), $S_k(x) = f(AM)$, ρ_k потенц.-зонд. = $f(AM)$, ρ_k град.-зонд. = $f(AM)$, ρ_k производной по $S_k(x) = f(AM)$.

Выявление зон выветривания, трещиноватости и закарстованности по кровле коренных пород, при их залегании на глубинах 30 - 40 метров, может быть весьма эффективным с использованием установки ВЭЗ-ИЛРП, с шагом перемещения установки (питающего электрода А) 5 - 20 м. В начале внедрения автором таких работ в 1986 году, именно с задачей выявления трещиноватых и закарстованных зон в кровле доломитов, этот способ в отчете по результатам работ был назван как ВЭЗ-профилирование.

Наиболее чувствительным к изменению состава и свойств осадочных пород, залегающих до глубины 30 - 40 метров, является метод ВЭЗ-ВП. С учетом того, что метод ВЭЗ-ВП является производным от метода ВЭЗ и величину удельной поляризуемости грунтов определяет (5.2.1), повышению результативности метода ВЭЗ-ВП может способствовать внедрение его модификации ВЭЗ-ВП(ИЛРП), при закреплённом питающем электроде А в установке Апост. $MN(B \rightarrow \infty)$. Как и для метода ВЭЗ это может быть достигнуто за счёт сокращения интервала осреднения разреза и, соответственно, определяемых параметров (η_i) по трём кривым η_k (потенц.-зонд.; град.-зонд.; производной по $S_k(x)$) после интерпретации кривых ρ_k .

Определение коррозионной активности грунтов по отношению к стали, учитывая принятое их разделение на грунты с высокой ($\rho_k = 20$ Ом), средней ($20 < \rho_k < 50$ Ом) и низкой ($\rho_k > 50$ Ом) активностью, может выполняться с обычной установкой ВЭЗ.

Применение методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП, как уже было отмечено выше, основано на том, что и удельное электрическое сопротивление, и поляризуемость осадочных пород являются функциями их глинистости, влажности, водонасыщенности, степени обогащения ионами различных солей, температурного режима и др. В теории электроразведки известны

аналитические зависимости между удельным электрическим сопротивлением и поляризуемостью, с одной стороны, и отдельными из перечисленных физико-химических факторов, при постоянстве остальных, с другой. Для удельных электрических сопротивлений песчано-глинистых пород эти зависимости, при всей их сложности, являются монотонными. Для удельной поляризуемости на каком-то интервале изменения одного и того же фактора наблюдается проявление экстремума [26, 36]. При заданной влажности (в том числе при полном водонасыщении) поляризуемость резко падает с увеличением засоленности пород зоны аэрации (или минерализации обводненных пород). Зависимость таких параметров, как относительная – $A_i^* = (\eta_i / \rho_i) * 100 \%$ [37] и абсолютная – $\Delta\rho_{вп} = \eta_i * \rho_i$ [37,39] удельные поляризуемости от перечисленных факторов более монотонны.

Ниже в качестве примеров геологического расчленения и корреляции геоэлектрического разреза рассмотрены результаты работ методом ВЭЗ-ИЛРП на опытном профиле участка "Стадион" в г.Щёлково. В качестве примера иллюстрации методики количественной и геологической интерпретации ВЭЗ-ВП в комплексе с другими методами приведены результаты работ на Неро-Озёрской мелиоративной системе [11, 41].

7.2. О результатах работ методом ВЭЗ-ИЛРП на участке "Стадион" в городе. Щёлково

Участок "Стадион" расположен на левом берегу реки Клязьмы, на плоской поверхности второй надпойменной террасы. Рельеф площадки выравненный, плоский. На участке выполнены только наблюдения ВЭЗ-ИЛРП по линии одного опытного профиля. Геологическое строение участка представлено аллювиальными песчано-глинистыми отложениями мощностью 7 - 15 м, залегающими на чёрных глинах юрского возраста или непосредственно на верхнекаменноугольных доломитах.

Наблюдения методом ВЭЗ-ИЛРП проведены по профилю длиной 80 м, при максимальном разnose $AM = 40$ м, с расстоянием между точками установки электрода А, равным 20 м, по 6-ти лучам. На рис. 7.2.1 приведен вертикальный разрез величин ρ_k потенциал-зондирования в координатах AM (по вертикали) и x - точки отражения (по горизонтали), с увязкой значений ρ_k потенциал-зондирования во взаимных точках. Интерпретация всех трёх кривых ВЭЗ-ИЛРП выполнялась от одних и тех же "нулевых приближений", определенных палеточно по кривым ρ_k градиент-зондирования, с учетом дополнительной информации по кривым ρ_k производным по $S_k(x)$. По результатам компьютерной интерпретации по программе VEZRP2 на интервале отработанного профиля

получен хорошо коррелируемый геоэлектрический разрез (рис. 7.2.1, в) по залегающему на глубинах 3.7 - 6.4 м низкоомному горизонту - предположительно кровле юрских глин.

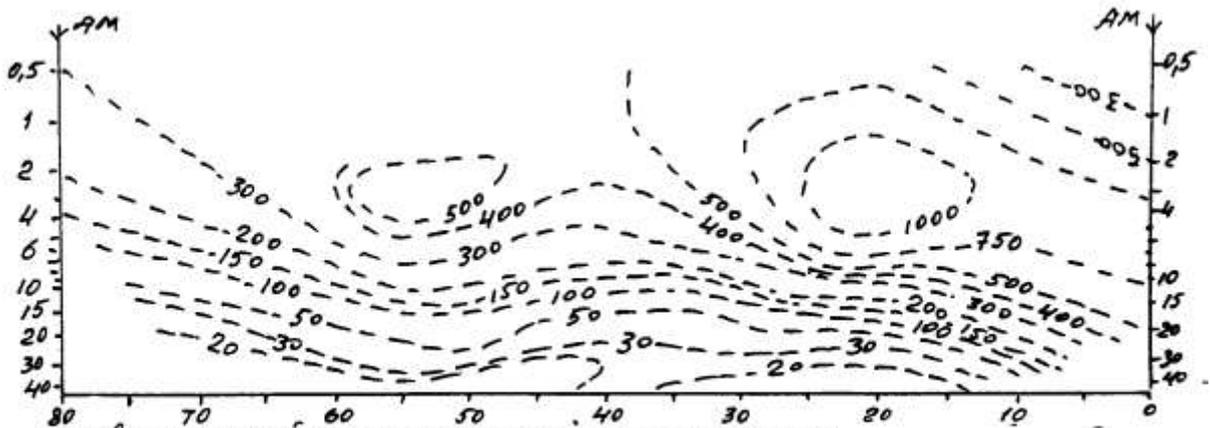
7.3. О результатах работ методами ВЭЗ-ВП и ВЭЗ на Неро-Озёрском участке в Нечернозёмной зоне

Участок Неро-Озерский расположен в центральной части Средне-Русской возвышенности, на заболоченной равнине озера Неро. В структурном отношении - это южное крыло Московской синеклизы. Сводный геологический разрез участка представлен образованиями нижнего триаса, верхней юры, нижнего мела и четвертичной системы. Особенно сложным является разрез отложений четвертичной системы, имеющих повсеместное распространение и состоящий из ледниковых, водно-ледниковых озерных осадков времен днепровского и московского оледенений, а также озерно-ледниковых и аллювиальных образований террасовых комплексов.

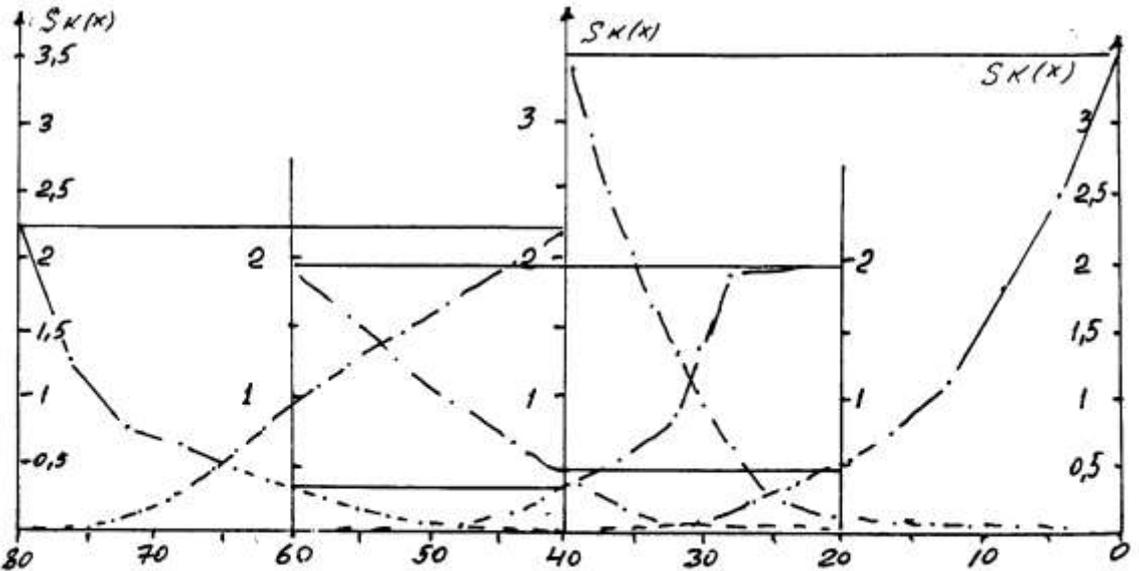
Глубина залегания грунтовых вод в пределах участка изменяется в зависимости от геоморфологических условий и глубины вреза речных долин от нуля (на заболоченных участках) до 10 - 25 м (на водоразделах). Минерализация грунтовых вод в основном не превышает 0.7 г/л.

По геоморфологическим признакам в пределах участка выделено три типа рельефа:

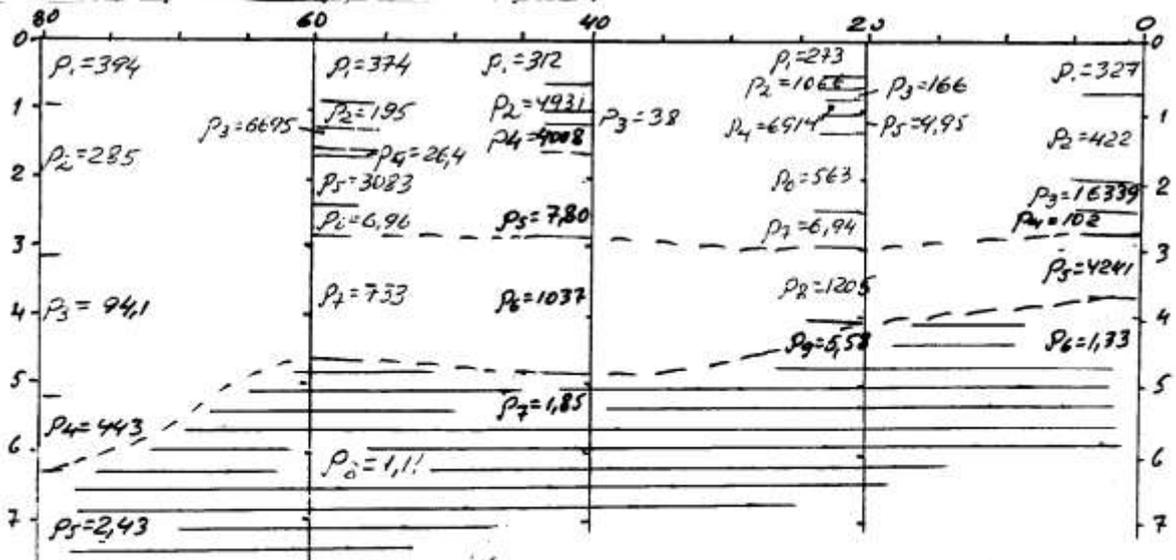
- 1) котловина оз. Неро (объединяющая пойменную, первую, вторую, третью террасы оз.Неро и питающих ее рек) с низкой, плоской, заболоченной поверхностью;
- 2) водно-ледниковая флювиогляциальная мелкохолмистая, местами заболоченная равнина; четким уступом высотой от 3 до 9.5 м и крутизной до 10° отделяется от котловины оз. Неро;
- 3) моренная полого-холмистая равнина;



а) Вертикальный разрез значений ρ_k потенциал-зондирования



б) Графики $S_k(x)$ по шести лучам



в) Результаты первичной компьютерной интерпретации 3-х кривых ВЭЗ-ИЛРП на основе заданных палеточных «нулевых приближений» ρ_i и h_i

Рис. 7.2.1 Пример работ ВЭЗ-ИЛРП по опытному профилю на участке «Стадион»

Таблица 8.2.1 результатов интерпретации кривых ВЭЗ-ИЛРП по опытному профилю участка "Стадион" от палеточных "нулевых приближений" параметров слоев - ρ_i , h_i (NE - количество итераций; OH(NE) - ошибка минимизации, в процентах)

Параметры слоев (ρ_i ; h_i); ош-ки в начале - OH(1) и конце минимизации - OH(NE); NE	Исходные "нулевые приближения" параметров слоев	Конечные параметры минимизации по VEZRP2			
		По крив. - ρ_k град. зонд.	По кривой- ρ_k потенц.-зонд.	По кривой ρ_k производной по $S_k(x)$ от достигнутых при минимизации ρ_k град.-зонд.- и ρ_k потенц.зонд.	
		RO1(i) H(i)	RO2(i) H2(i)	По крив. ρ_k производным. по $S_k(x)$ RO3(i) H3(i)	Осредн. по 3-ем кривым ρ_k RO(i) H(i)
1	2	3	4	5	6
1. Луч 0 → 40					
ρ_1	305	295	354	331	327
ρ_2	380	456	477	512	422
ρ_3	15200	19896	14780	14341	16339
ρ_4	82	107	90.3	108	102
ρ_5	5700	4384	4616	3722	4241
ρ_6	1.4	1.39	1.37	1.24	1.33
h_1	0.84	0.75	0.72	0.71	0.72
h_2	1.76	1.21	1.36	1.24	1.27
h_3	0.35	0.45	0.34	0.38	0.39
h_4	0.45	0.35	0.41	0.37	0.38
h_5	1.2	0.92	0.97	0.91	0.93
OH(1)		24.31	175.78		
NE		28	6		
OH(NE)		11.90	45.57	33.18	56.77
2. Луч 20 → 60					
ρ_1	203	360	198	262	273
ρ_2	8120	1141	848	1208	1066
ρ_3	155	210	156	130	165
ρ_4	24000	10113	2790	7840	6914
ρ_5	6.4	11.32	7.24	11.28	9.95
ρ_6	420	578	479	642	567
ρ_7	6.4	7.75	7.13	5.25	6.72
ρ_8	1120	965	1283	1366	1205
ρ_9	5.3	5.24	5.27	6.24	5.58

1	2	3	4	5	6
h ₁	0.50	0.42	0.54	0.50	0.49
h ₂	0.12	0.157	0.126	0.148	0.144
h ₃	0.17	0.142	0.173	0.164	0.160
h ₄	0.11	0.159	0.128	0.306	0.298
h ₅	0.30	0.159	0.265	0.200	0.208
h ₆	0.90	1.19	1.02	1.15	1.12
h ₇	0.60	0.49	0.54	0.53	0.52
h ₈	1.10	0.94	1.26	1.15	1.12
OH(1)		68.78	72.81		
NE		12	2		
OH(NE)		19.08	72.43	52.13	5.69
3. Луч 40 → 0					
ρ ₁	720	699	691	693	684
ρ ₂	88	90.2	83.2	95.0	89.4
ρ ₃	3600	3857	4694	4684	4411
ρ ₄	6.4	7.13	6.60	7.52	7.08
ρ ₅	480	642	573	503	573
ρ ₆	2.0	2.02	2.04	1.82	1.96
h ₁	2.10	2.26	2.59	2.47	2.44
h ₂	0.40	0.39	0.43	0.40	0.41
h ₃	0.30	0.32	0.39	0.36	0.36
h ₄	1.30	1.17	1.26	1.18	1.20
h ₅	1.50	2.00	1.79	1.83	1.88
OH(1)		23.19	33.15		
NE		7	6		
OH(NE)		11.56	15.17	20.81	22.33
4. Луч 40 → 80					
ρ ₁	260	318	297	321	312
ρ ₂	4800	4811	6100	3883	4931
ρ ₃	30	40.0	30.9	43.0	38.0
ρ ₄	3400	4568	4299	3156	4008
ρ ₅	6.4	6.51	8.06	8.83	7.80
ρ ₆	1240	1366	929	817	1037
ρ ₇	2.0	2.00	1.95	1.60	1.85
h ₁	0.74	0.63	0.69	0.62	0.65
h ₂	0.20	0.20	0.25	0.21	0.22
h ₃	0.40	0.30	0.39	0.32	0.34
h ₄	0.35	0.47	0.44	0.43	0.45
h ₅	1.40	1.37	1.09	1.16	1.21
h ₆	2.20	2.42	1.64	1.92	2.00
OH(1)		25.40	31.62		
NE		28	28		
OH(NE)		9.22	5.64	36.40	59.10

1	2	3	40	5	6
5. Луч 60 → 20					
ρ_1	440	375	386	361	374
ρ_2	195	249	178	158	195
ρ_3	6600	6468	6145	7472	6695
ρ_4	28.0	29.3	28.5	21.3	26.4
ρ_5	3400	2713	3095	3441	3083
ρ_6	6.4	6.12	6.98	7.76	6.96
ρ_7	800	836	545	818	733
ρ_8	2.00	2.05	0.38	0.90	1.11
ρ_9	420	421	358	323	367
h_1	1.00	0.70	1.02	0.89	0.87
h_2	0.43	0.33	0.46	0.41	0.40
h_3	0.30	0.29	0.28	0.30	0.29
h_4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
h_5	0.90	0.72	0.82	0.79	0.78
h_6	0.50	0.52	0.46	0.46	0.48
h_7	2.00	2.09	1.36	1.79	1.75
h_8	1.50	1.46	4.92	3.31	3.23
OH(1)		30.71	176.60		
NE		22	10		
OH(NE)		6.73	10.69	100.88	
6. Луч 80 → 40					
ρ_1	435	394	402	385	394
ρ_2	320	264	290	302	285
ρ_3	80	103.2	79.6	99.6	94.1
ρ_4	390	395	465	468	443
ρ_5	2.30	2.73	2.41	2.14	2.43
ρ_6	19.0	25.4	19.8	20.4	21.9
h_1	0.95	0.90	0.95	0.94	0.93
h_2	1.95	2.26	2.09	2.22	2.19
h_3	2.10	1.82	2.32	2.11	2.08
h_4	1.00	1.00	1.19	1.12	1.10
h_5	2.35	1.98	2.24	2.04	2.09
OH(1)		15.40	13.25		
NE		28	8		
OH(NE)		6.91	6.87	10.87	13.25

Полевые геофизические наблюдения (методами электроразведки ВЭЗ-ВП, ВЭЗ и сейсморазведки МПВ) проводились в масштабе 1:50000, с расстоянием между точками наблюдений 0.5-1.0 км.

Определение мощности зоны аэрации (глубины залегания грунтовых вод) проводилось с помощью сейсморазведки МПВ, с 12-ти канальной сеймостанцией при ударном способе возбуждения, расстоянием между сейсмоприемниками от 2 до 5 м. Система наблюдений из 4-8 м пунктов удара обеспечивала построение встречных годографов преломленных волн от границ, залегающих на глубине до 30 м. Обработка годографов и построение геосейсмических разрезов проводились способом t_0 .

Изучение литологического состава пород и определение их фильтрационных свойств выполнялось методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП. Электроразведка ВЭЗ проводилась с применением аппаратуры низкой частоты ИКС-50 при максимальных полуразносах питающих электродов АВ/2 - 225 - 340 м. При проведении ВЭЗ-ВП использовалась станция ВПС-63, в режиме 30-с зарядки однополярными импульсами поляризующего тока, с осциллографической регистрацией спада потенциалов вызванной поляризации. Измерения выполнялись при максимальной величине АВ/2 - 225 м. Кривые η_k строились по расчетным величинам $\Delta U_{\text{вп}}$, снятым с кривой спада через 1 с после выключения поляризующего тока.

Количественная интерпретация кривых ρ_k осуществлялась с помощью палеток А.М.Пылаева [49] и вспомогательных палеток ВЭП-К и ВЭП-А [39]. Интерпретация кривых η_k проводилась по разработанным автором палеткам и номограмм-палеткам ВЭЗ-ВП [39, 42]. Количественной интерпретации кривых ρ_k и η_k предшествовало районирование Неро-Озерского участка по типам разрезов и кривых кажущихся сопротивлений и поляризуемостей [11, 41]. Оно выполнено на основе предварительного деления площади участка по геоморфологическим типам (котловина оз. Неро; флювиогляциальная равнина; моренная равнина) и типам кривых $\rho_k = f(\text{AB}/2)$ и $\eta_k = f(\text{AB}/2)$. В процессе этой работы было отмечено наличие качественной связи между геоморфологическими элементами и особенностями разрезов $\rho_k = f(\text{AB}/2)$ и $\eta_k = f(\text{AB}/2)$. Так наиболее возвышенным участкам моренной равнины соответствуют слабо дифференцированные разрезы ρ_k и η_k , с изменением значений ρ_k в пределах 15 - 35 Омм и η_k от 0.25 до 0.50 % (рис. 7.3.1).

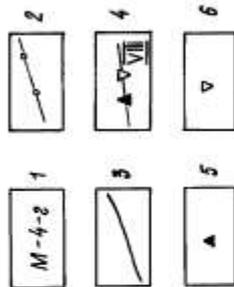
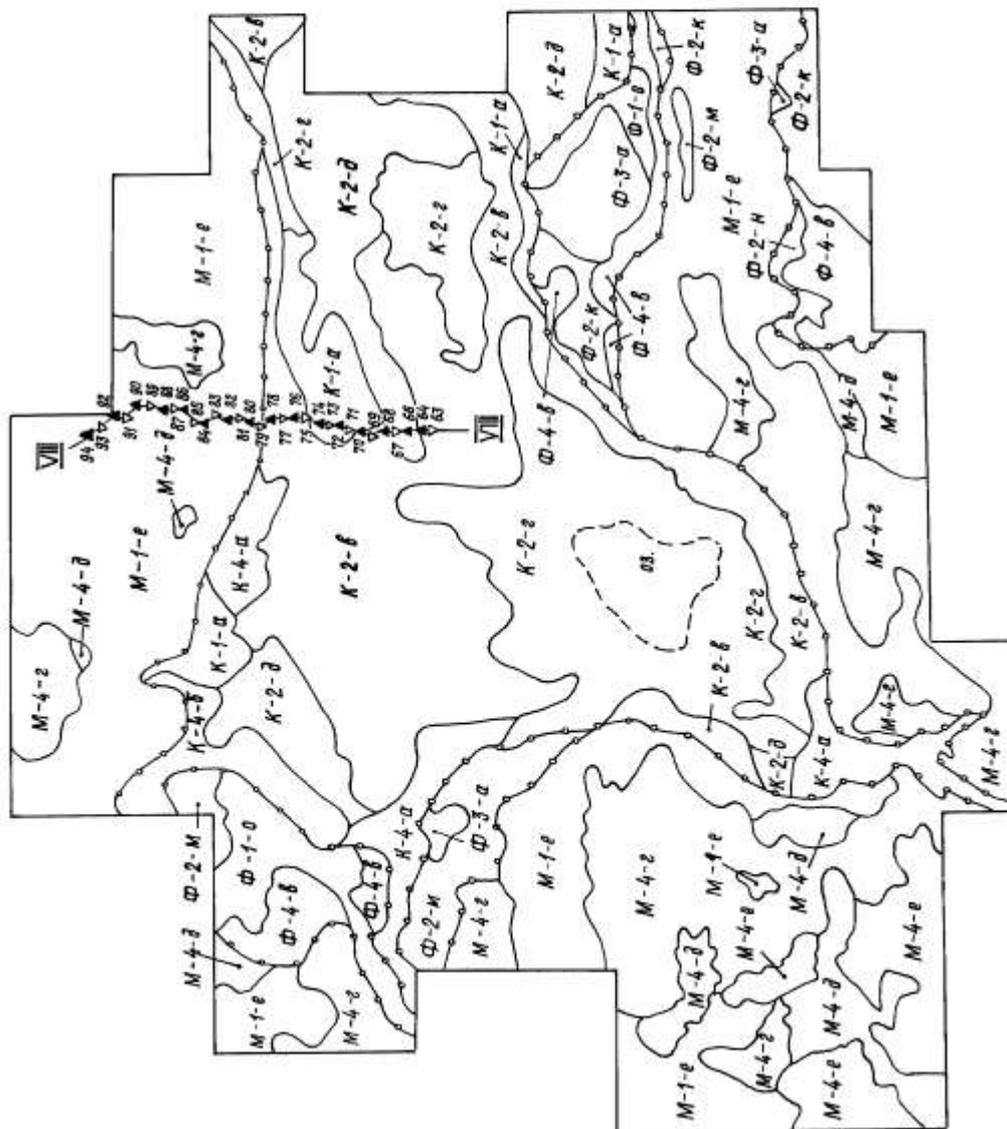


Рис. 6.31. Карта подтипов литологических разрезов Неро-Озёрского участка, составленная на геоморфологическую основу (К - котловина оз. Неро), Ф - флювиогляциальная равнина, М - моренная равнина) по типам кри-
 вых R_k и R_k .
 I - шифр подтипа литологического разреза; 2 - геоморфологические границы; 3 - границы между различными подтипами литологических разрезов; 4 - линия приземного геолого-геофизического разреза; 5, 6 - пикеты наблюдений.

Описание шифров подтипов литологических разрезов на рис. 34.
 Составлен Дуванским И.Г.,
 Дуванской Р.Н., Моргунюк И.П.



На склонах моренной равнины разрезы R_k и η_k принимают более сложный характер; здесь величины R_k изменяются от 30 до 60 Омм, а η_k - от 0.4 до 1.0 %. В пределах котловины оз. Неро разрезы R_k и η_k становятся сложно изрезанными, с изменением значений R_k от 20 до

200 Омм и η_k от 0.8 до 2.0 %. Шифр подтипов геолого-литологических разрезов (рис. 7.3.1) включает определенный вид геолого-литологического разреза и соответствующие ему осредненные кривые ρ_k и η_k . Подробная характеристика подтипов геолого-литологических разрезов приведена на рис. 7.3.2.

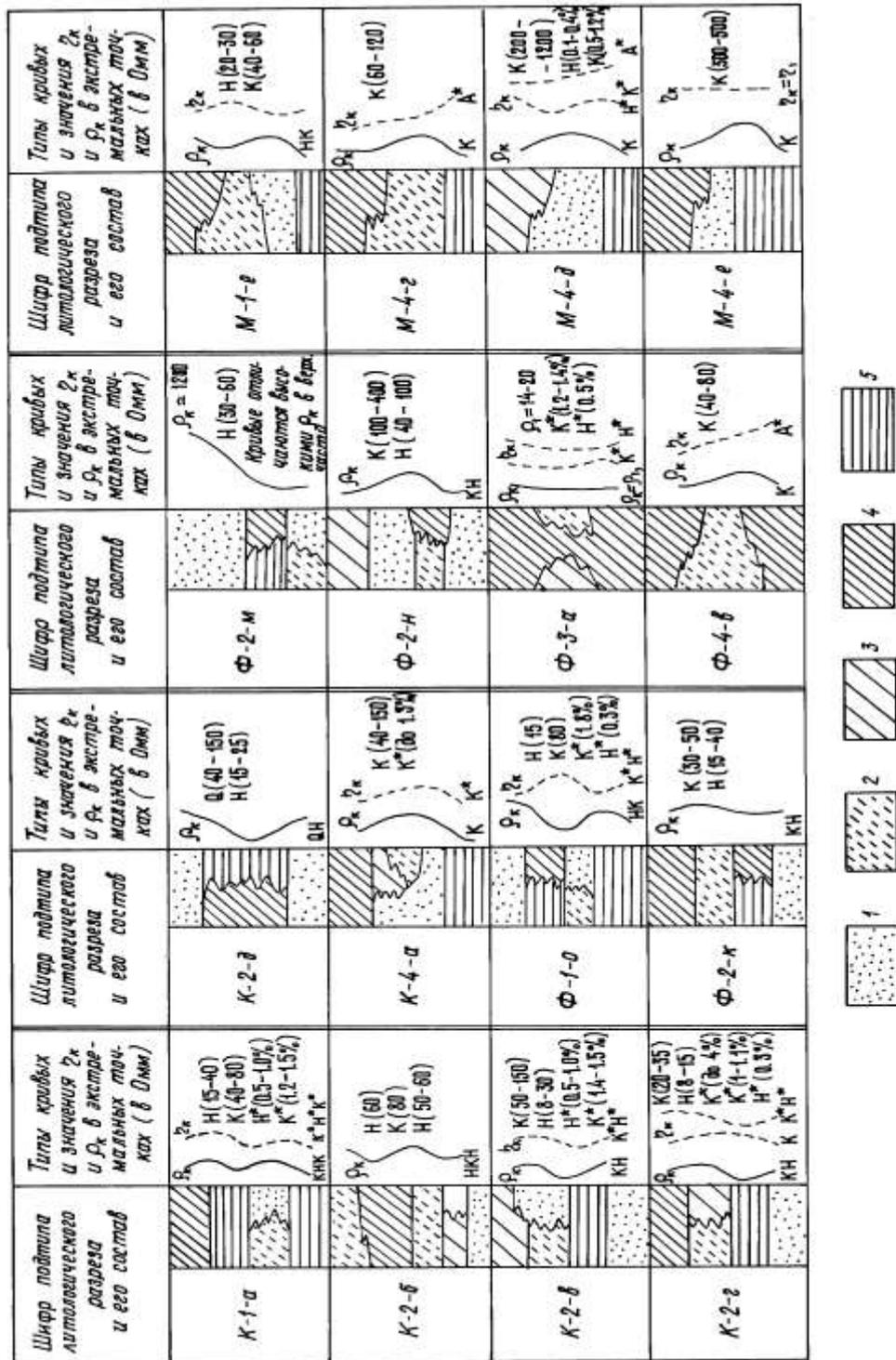


Рис. 6.3.2. Литологический состав и описание кривых ρ_k и ρ_{k1} к шифрам подтипов литологических разрезов Неро-Озёрского участка (рис. 33).
 I - пески; 2 - супеси; 3 - суглинки легкие; 4 - суглинки тяжелые; 5 - глины.
 Составлен Моргунов И.П. и Дуванский И.Г.

Количественная интерпретация кривых ρ_k и η_k проводилась в несколько этапов. На первом этапе была проведена интерпретация кривых ρ_k (ВЭЗ и ВЭЗ-ВП) на основе предварительных литолого-стратиграфических разрезов, составленных по данным бурения в пределах соответствующих геоморфологических элементов. Интерпретация кривых η_k выполнялась при закрепленных параметрах ρ_i и h_i , полученных на первом этапе интерпретации кривых ρ_k .

Преобразование геоэлектрических разрезов в геолого-литологические осуществлялось на основе дополнительной геологической информации и частных закономерностей, установленных между параметрами ρ_i , η_i , A_i^* , a_i и литологическим составом пород для ограниченных участков профилей или отдельных зон Неро-Озёрской мелиоративной системы. Это объясняется тем, что в целом для данного района взаимоотношение числа пластичности и параметров ВЭЗ-ВП не имеет необходимой тесной корреляционной связи. Комплексное изучение разреза по параметрам ρ_i и η_i выполнялось до глубин 20 - 30 м. Литологическое расчленение разреза на больших глубинах (до 50 - 70 м) проводилось лишь по величинам удельных сопротивлений. При построении геоэлектрических разрезов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП, особенно при интерполяции геолого-литологических построений между скважинами, большое значение имели параметры эквивалентности кривых ρ_k [23] и η_k [39,59].

Определение коэффициентов фильтрации пород зоны аэрации являлось наиболее важной задачей геофизических исследований. Оно выполнялось на основе предварительно составленных зависимостей $K_f = f(\rho_i)$, $K_f = f(\eta_i)$, $K_f = f(a_i)$ - рис. 7.3.3.

Эти зависимости получены в результате графического сопоставления параметров ВЭЗ-ВП с данными опытных наливов в шурфы и скважины. Коэффициенты фильтрации песчаных разностей пород зоны аэрации получены по способу А.К. Болдырева, для глин и суглинков - по способу Н.Н.Биндемана и Н.С.Нестерова [8, 11, 47]. На основе этих корреляционных зависимостей, составленных с учетом дифференциации пород по литологическому составу, по полученным в результате количественной интерпретации параметрам ВЭЗ-ВП (ρ_i , η_i , a_i) находились искомые значения величин коэффициента фильтрации пород зоны аэрации [11]. Приближение результатов интерпретации (по определению коэффициентов фильтрации пород зоны аэрации) оценивалось сравнением гидрогеологических параметров, полученных прямым путем, с аналогичными параметрами, найденными косвенно, по геофизическим данным на основе корреляционных зависимостей.

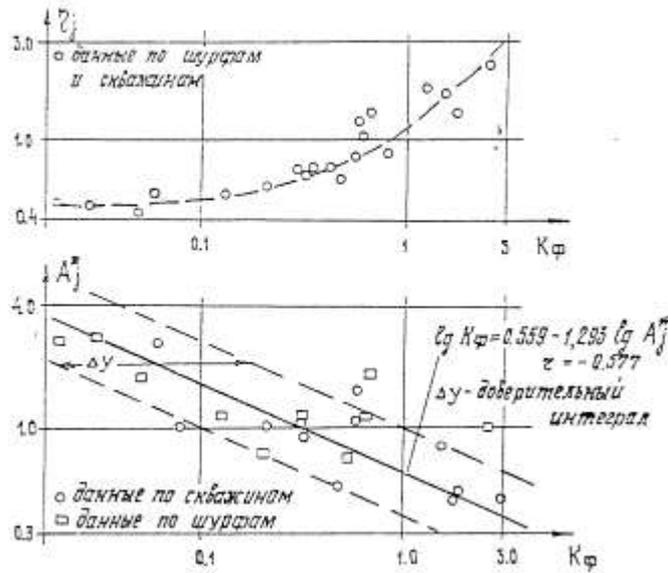
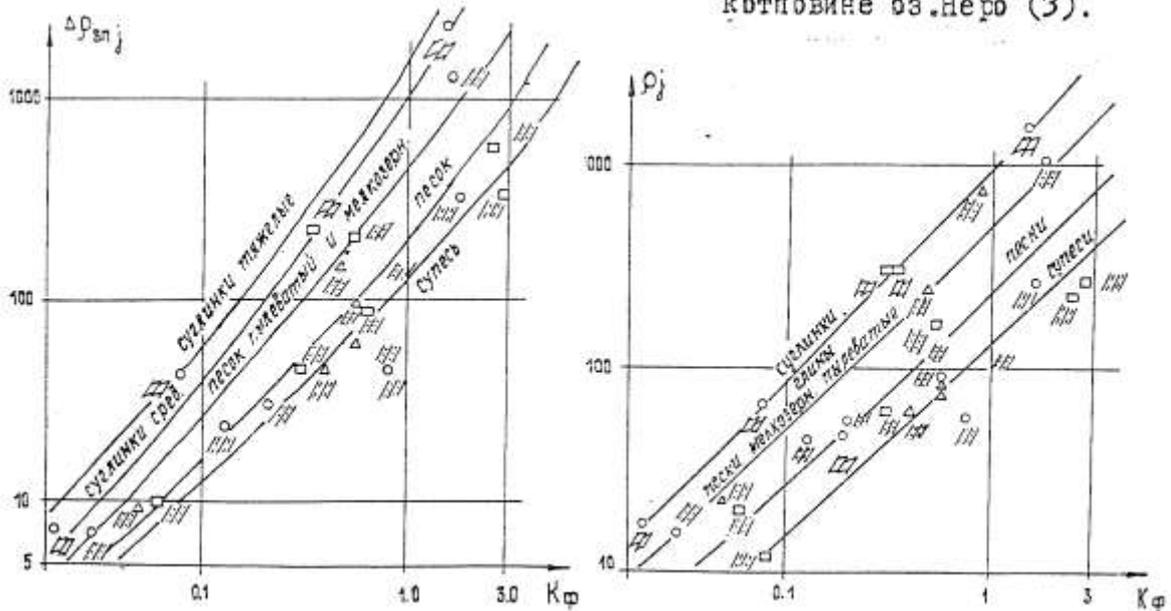


Рис. 6.35. Графики зависимости коэффициента фильтрации пород зоны аэрации Неро-Озёрского участка с параметрами ВЭЗ-ВП (ρ_j ; z_j ; $A_j^* = z_j/\rho_j \cdot 100$; $\Delta\rho_{влj} = 2_j \cdot \rho_j$).
 I, 2, 3 - геоморфологические положение точек наблюдений (для графиков $K_f = f(\rho_j)$, $K_f = f(\Delta\rho_{влj})$) на морене (I), флювиогляциальной равнине (2), котловине оз. Неро (3).



Карта фильтрационных свойств пород зоны аэрации составлена в градациях коэффициентов фильтрации 0.1; 0.1 – 0.5; 0.5 – 1.0; 1.0 – 1.5; 1.5.- 5.0 м./сутки.. Абсолютная ошибка не превышает одной градации [11]. При этом следует отметить, что опорные величины K_f по данным наливов включает в себя – 5 – 10 % погрешности опытных работ.

Изучение корреляционной связи между засоленностью (С) пород зоны аэрации и параметрами ВЭЗ-ВП (ρ_i , η_i , A_i^* , $\Delta\rho_{влi}$) выполнено на основе 132 лабораторных определений засоленности по монолитам, отобраным через 1-2 м. Полученные результаты [47] показали, что удовлетворительная корреляционная связь существует только между засоленностью и удельной поляризуемостью [11] (рис. 7.3.4).

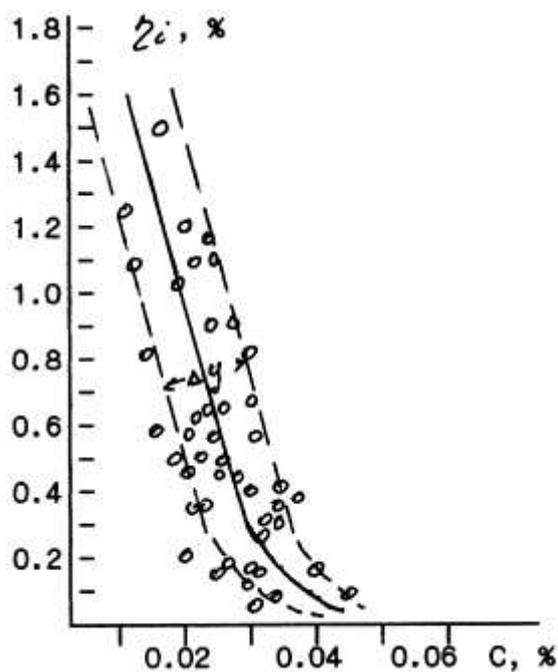


Рис. 7.3.4. График соотношения величин засолённости (C) пород зоны аэрации с параметром ВЭЗ-ВП - η_i

На большей части интервала она характеризуется линейной зависимостью, выраженной уравнением $C = 0.03667 - 0.018 * \eta_i$, с коэффициентом регрессии $r = - 0.835$ и величиной доверительного интервала $\Delta y = 0.01348$ (в %). На основании этой зависимости выполнялось определение величин засолённости по расчетным значениям удельной поляризуемости. Эти данные использовались при составлении эпюр засолённости и построении карты инженерно-геологического районирования Неро-Озёрской мелиоративной системы.

Применение геофизических методов позволило получить надежную информацию по определению коэффициента фильтрации пород зоны аэрации и другим инженерно-геологическим и гидрогеологическим характеристикам, с сокращением объёмов буровых работ и инженерно-геологического опробования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе исследования были направлены на совершенствование электроразведки методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач по двум направлениям. Первому – разработке интерпретации вертикальных электрических зондирований методом вызванной поляризации от существующих на начало исследований различных эмпирических способов до уровня

обоснованных палеточных и машинных. Второму – созданию лучевой электроразведки ВЭЗ и ВЭЗ-ВП, при закрепленном питающем электроде А с установкой А-пост. MN(B→).

Разработанная теория палеточной количественной интерпретация кривых ВЭЗ-ВП и улучшение интерпретации кривых ВЭЗ (за счет уточнения координат точек А и К) позволяет с высокой эффективностью проводить подготовку “нулевых приближений“ при компьютерной интерпретации кривых ρ_k и η_k . В работе это рассмотрено на примере гидромелиоративных исследований на Неро-Озёрском участке в Нечернозёмной зоне, вблизи г. Ростова-Великого. В настоящее время некоторые геофизики-электроразведчики пытаются отнести палеточную подготовку “нулевых приближений“ к изжившей себя при современном компьютерном уровне интерпретации. С этим можно согласиться только при наличии большого количества опорных скважин. Однако геофизические исследования, как правило, являются опережающими и тогда компьютерная интерпретация кривых ρ_k и η_k будет более успешной при палеточном определении “нулевых приближений“.

Внедрение лучевой электроразведки, при закрепленном питающем электроде А и непрерывным пошаговым переходом М в прдшествующую точку электрода N, открывает новые возможности в теории и практике электроразведки на постоянном токе. Полученные при этом результаты интерпретации наблюдаемых и расчетных кривых: $\rho_k^{ПЗ}$ – потенциал-зондирования; $\rho_k^{ГЗ}$ – градиент-зондирования (обычных ВЭЗ); производной по Sk(x) ($\rho_k^{ПЗ} Sk(x) = (\rho_k^{ПЗ})^2 / (\rho_k^{ГЗ})$) могут быть более точно привязаны к соответствующим элементам геоэлектрических границ. Опробование этой системы наблюдений на многих объектах исследований 56 ИИИ показали её высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова Е.Ш. Алгоритм решения обратной задачи ВЭЗ с учетом геологической информации. Экспр.-информ. ВИЭМС "Региональная, разведочная и промысловая геофизика". М., 1979, N 1, с. 25-31.
2. Абрамова Е.Ш. Способ оперативного и точного вычисления интегралов, применяемых к расчету геофизических кривых. ВСЕГИНГЕО, препринт, 1985. -12с.
3. Альбом палеток трехслойных кривых ВЭЗ. Гостоптехиздат, 1941.
4. Альпин А.М. Заметки по теории электрической разведки. Глав. ред. горнотопливной литературы. М.-Л. Союз. геофиз. трест., вып. 1 (8), 1935. -71с.
5. Альпин А.М. Негоризонтальные границы раздела и палетки НЗЛ. Сб. по прикладной геофизике, N 1 , 1940.

6. Анищенко Г.Н. Кажущаяся продольная проводимость в электроразведке. Экспресс-информ. Сер. IX - Региональная, разведочная и промысловая геофиз. Вып. 21. М., ВИЭМС, 1974, 40 с.
7. Белаш В.А. Интерпретация данных морских электрических зондирований по дифференциальным параметрам. В кн.: Прикладная геофизика, вып. 79. М.-Недра, 1975, с. 136-141.
8. Биндеман Н.Н. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливками и нагнетаниями. М.: Углетехиздат, 1951. - 52 с.
9. Богословский В.А., Ильина Е.Б., Кузьмина Э.Н., Мыщик Н.В., Огильви А.А., Рудерман Е.Н. Вопросы интерпретации ВЭЗ на ЭВМ при изучении условий залегания подземных вод. М., ВИНТИ, 1976.
10. Ваньян Л.Л., Морозова Г.М., Ложеницына Л.В. О теоретических кривых метода вызванной поляризации. Геология и геофизика, 1961, N 10
11. Волобуев В.Г., Глинский М.Л., Графский Б.В., Дуванский М.Г., Моргун И.П. Эффективность применения геофизических методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при мелиоративных инженерно-геологических исследованиях. "Инженерная геология", М., 1982, вып. 5, с. 81-87.
12. Вольский Б. С., Кунин Н. Я., Терехин Е. И. Краткий справочник по полевой геофизике. М. "Недра", 1977 – 392 с
13. Дахнов В. Н., Латышова М. Г., Ряполова В. А. Исследование скважин методом искусственно вызванных потенциалов (электролитический каротаж). - В кн. : Промысловая геофизика. М., Гостоптехиздат, 1952, с. 46 - 82
14. Дахнов В.Н. Злектрическая разведка нефтяных и газовых месторождений. Гостоптехиздат, 1953.
15. Егорова Л.В. Программа "Поле-75" для решения прямой и обратной задачи ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для ЭВМ М-222. НПО "Геофизика"., Л., 1979.
16. Ермохин К.М. Программа ВЭЗ-ВП-Т для расчета временных характеристик горизонтально-слоистых сред по схеме вертикального электрического зондирования. НПО "Геофизика". Л., 1979.
17. Заборовский А.И. Злектроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963, - 415 с.
18. Жаворонкова В. В., Кормильцев В. В. К вопросу о происхождении вызванной поляризации пирита. – В кн. Электрометрия при поисках сульфидных месторождений. Свердловск, с. 19 – 22 (Труды ин-та геофизики УФ АН СССР)
19. Изотова Е.Б., Хорев О.А. Алгоритмы и программы интерпретации многослойных кривых ВЭЗ. Л., 1968.

20. Изотова Е.Б., Егорова Л.В. Программа "Поле" для решения прямой и обратной задачи ВЭЗ. Л., ВИРГ, 1972.
21. Изотова Е.Б. Направленный подбор при решении обратных задач геофизики. Изв. АН СССР, Серия Физики Земли, N 4, 1974, с. 50-58.
22. Исследование ошибок машинной интерпретации ВЭЗ. "Уч. записки Перм. Ун- та", 1975, N 357, с. 112- 116.
23. Каленов Е.Н. Интерпретация кривых вертикальных электрических зондирований. М., Гостоптехиздат, 1957.- 472 с.
24. Калнин Р.А. Алгебра и элементарные функции. Изд. Глав. ред. физ.-мат.литературы, М., 1975, 148 с.
25. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. М.,Недра, 1972.
26. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. М.,Недра, 1980.
27. Комаров В.А., Пишпарева Н.А., Семенов И.В., Хлопонина Н.С. Вопросы теории метода вызванной поляризации. "Методика и техника разведки." Л.,ОНТИ ВИТР, 1961, N 30.
28. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., Наука, 1974.
29. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. Пер. с англ. Р.А. Коваленко под ред. М.Н. Бердичевского - М.: Недра, 1984. - 270 с.
30. Латышова М.Г. О зависимости между вызванными потенциалом и проницаемостью песчаников. Труды Моск. нефт. ин-та, 1953, вып. 12, с. 75-79.
31. Майе Р. Математические основания электрической разведки постоянным током. Пер. с франц. под общ. ред. и с примечаниями Заборовского А.И. М., Гортоплит, 1935. (Труды Всесоюзной конторы /треста/ геофизических разведок главного управления нефтяной промышленности).
32. Мартэн М. К вопросу интерпретации данных полевой электроразведки. ВКГР, 1937.
33. Марченко Ю.А., Фисюн Е.А. Опыт применения геофизических методов при съемке для целей мелиорации в Степном Крыму. Экспр.-информ. ВИЭМС "Гидрогеология и инженерная геология". М.,1976, N 2
34. Матвеев Б.К. Методика графического построения электрических зондирований. М., Недра, 1964., 72 с.
35. Матвеев Б.К., Поносов В.А. Приемы обработки и интерпретации результатов ВЭЗ-ВП. Уч. записки Перм. ун-та, 1976, N 359, с. 109-117.

36. Методические указания по применению метода вызванных потенциалов при инженерно-геологических изысканиях. Всесоюзн. научн.-исслед. ин-т транспортного строительства, 1968, с. 46.
37. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. М., Недра, 1972, 296 с.
38. Моргун И.П., Петрукович Л.В. Расчет теоретических кривых кажущейся поляризуемости для двухслойных и трехслойных сред.-В "Информационном сборнике" МГУ, 1975, с. 18-24.
39. Моргун И.П. Теоретические кривые поляризационной восприимчивости для метода ВЭЗ-ВП. Деп.-79, N 3116, ВИНТИ, М., 1979.- 64 с.
40. Моргун И.П. Анализ применяемых способов интерпретации многослойных кривых ВЭЗ-ВП. -Вест. МГУ, 1981, сер. Геология, вып. 1, с. 98-102.
41. Моргун И.П. Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд.геол.- мин. наук. М.: МГУ, 1981, 17 с.
42. Моргун И.П. Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Дис. на соиск. уч. ст. канд.геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1981, 439 с.
43. Моргун И. П. Модификация ВЭЗ при закрепленном питающем электроде А трехэлектродной установки А-пост. $MN(B \rightarrow \infty)$. В сб.: Геологическое изучение и использование недр., вып. 4. Геоинформцентр. М. 2003, с. 13 – 18.
44. Моргун И.П., Хмелевской В.К. Совместная интерпретация графиков ВЭЗ и ВЭЗ-ВП. "Прикладная геофизика" (Москва), 1982, N 105, с. 114-116
45. Моргун И.П., Хмелевской В.К., Ильина Е.Б. Одномерная интерпретация ВЭЗ-ВП с использованием палеток и ЭВМ. В кн. Международная научная конференция "Геофизика и современный мир", 9-13 августа 1993 г. Сб. рефератов и докладов. М., 1993, с. 339-340.
46. Мыщик Н.В. Интерпретация электроразведочных данных на ЭВМ при решении гидрогеологических задач. Дисс. на соиск. уч.степ. канд. геол.-мин. наук. М., 1978
47. Насберг В.М. Краткие итоги исследований гидротехнической лаборатории по фильтрации.-Изв. Тбилисск. н.и. сооружений теплотехники, 1962,т.14, с.80-114.
48. Нгуен Ван Туй, Одинцов К.Л., Хмелевской В.К. Трансформации кривых электрических зондирований для повышения эффективности инженерно-геологических и гидрогеологических исследований.//Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геол.-1987.-N 1.- с. 85-89.
49. Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М., Госгеолиздат, 1943, 147 с.

50. Рокитянский И.И. Лабораторное изучение вызванной поляризации осадочных пород. Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. 1957, N 2, с. 217-227.
51. Рыжиков Ю.И. Программирование на Фортране POWER STATION для инженеров. Практическое руководство. С.-Петербург, Корона, принт, 1999. -159 с.
52. Рыжов А.А. Алгоритм и программа расчета кривых ВЭЗ-ВП и ρ_k на ЭВМ. ВСЕГИНГЕО. М., 1975.
53. Рыжов А.А., Гудзь В.И. Программы машинной интерпретации данных ВЭЗ и ВЭЗ-ВП. ВСЕГИНГЕО. М., 1978.
54. Руководство по интерпретации кривых ВЭЗ МДС. ПНИИЦИС-М.: Стройиздат, 1984.-200 с.
55. Страхов В.Н., Карелина Г.Н. Об интерпретации данных вертикальных электрических зондирований на электронных вычислительных машинах. В кн.: Прикладная геофизика. Вып. 56. М., Недра, 1969. с. 118-129.
56. Тихонов А.Н. Об электроразведке над наклонным пластом. Тр. Ин-та Теоретической геофизики АН СССР, т. 1, 1946.
57. Фридрихсберг Д. А., Сидорова М. П. Исследования связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем. – Вестн. Ленингр. Ун-та. Сер. Физика и химия, 1961, N° 4, с. 57 - 69
58. Хмелевской В.К. Ускоренный способ графических построений и интерпретации кривых электрического зондирования. Экспр.-информ. ВИЭМС "Региональная, разведочная и промысловая геофизика., N 57. М., 1970.
59. Хмелевской В.К., Моргун И.П. Ускоренная интерпретация кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП с помощью номограмм-палеток. ЭИ. ВИЭМС.- Регион., развед. и промысловая геофизика, 1981, вып. 7, с. 28-32.
60. Хуторянский В.К. Алгоритм решения обратной задачи ВЭЗ с помощью ЭВМ. Труды СНИГИИМСа. Новосибирск, 1976, вып. 238.
61. Шалат П. Применение теории линейных систем к вычислению интегралов геоэлектрических зондирований. В кн.: Вопросы геофизики. Вып.23. Уч.зап. ЛГУ. 1973
62. Шкабарня Н.Г., Севостьяненко В.П. Алгоритм расчета кажущихся сопротивлений и поляризуемостей для среды с наклонными границами.//Проблемы автоматизации геофизических исследований.-ДВНЦ АН СССР, 1985.- с. 35-40.
63. Электрическое зондирование геологической среды. Часть I. Прямые задачи и методика работ. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. Изд. Моск. ун-та, 1988. -176 с.

64. Электрическое зондирование геологической среды. Часть II. Интерпретация и практическое применение. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. Изд. Моск. ун-та, 1992. -200 с.
65. Электроразведка методом сопротивлений./Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М., изд. МГУ, 1994 г., 160 с. (с. 38-47)
66. Электроразведка: Справочник геофизика. Под ред. А.Г. Тархова.-М.: Недра, 1980.- 518 с.
67. Электроразведка: Справочник геофизика. Книга первая. Под ред. В.К. Хмелевского и Б.М. Бондаренко. М.:Недра, 1989. -438 с.
68. Ярославцев А.И. Методика приближенного расчета и интерпретации графиков ВЭЗ-ВП. "Геология и геофизика", 1967, N 2. Изд. СО АН СССР.
69. Ghoch, D.P. The application of linear filter to the direct interpretation of geophysical resistivity sounding measurements. Geophysical Prospecting, v. 19. no. 2, 1971.

ОГЛАВЛЕНИЕ

стр.

ВВЕДЕНИЕ	
Глава 1. Физико-химические основы и установки электрических зондирований	
методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП	
1.1. Удельное электрическое сопротивление и удельная электрическая	
поляризуемость горных пород	
1.2. Установки электрических зондирований методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП	
Глава 2. Расчет кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП для многослойных горизонтально-слоистых	
сред	
2.1. Расчет многослойных кривых ρ_k град.-зонд., потенц.-зонд. и производной	
по $S_k(x)$ для горизонтально-слоистых сред	
2.2. О дифференциальных и интегральных трансформациях кривых ρ_k ВЭЗ (град.	
-зонд.)	
2.3. Расчёт многослойных кривых ВЭЗ-ВП (ИЛРП)	
Глава 3. Об изучении наклонных - трёхмерных сред методом ВЭЗ	
3.1. Обзор работ по изучению наклонных – трёхмерных сред методом ВЭЗ	
3.2. О преимуществах наблюдений ВЭЗ-ИЛРП с трёхэлектродной установкой	
А-пост. MN($V \rightarrow \infty$)	
Глава 4. Расчет методом зеркальных (многократных) отражений двухслойных кривых	
ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при наклонной геоэлектрической границе, наклонном дневном	
рельефе и горизонтальном градиенте послойных величин удельных	
электрических сопротивлений и поляризуемостей	
4.1. Расчёт методом зеркальных отражений двухслойных кривых ВЭЗ-ИЛРП	
при наклонной геоэлектрической границе и горизонтальном рельефе дневной	
поверхности	
4.2. Расчёт методом зеркальных отражений двухслойных кривых ВЭЗ-ИЛРП	
при наклонном рельефе дневной поверхности и горизонтальной	
геоэлектрической границе	
4.3. Расчёт методом зеркальных отражений двухслойных кривых ρ_k	
потенциал-зондирования. при наклонной геоэлектрической границе и	
наклонном дневном рельефе	

4.4. О проявляемом при наблюдениях ВЭЗ-ИЛРП отражающем интервале геоэлектрической границы и вкладе в сумму измерений $[U/I]_{(x(j))}$ каждого элемента отражающей площадки	
4.5. Расчёт методом многократных отражений двухслойных кривых ρ_k потенц.-зонд. при горизонтальном градиенте послойных величин ρ_1 и ρ_2	
4.6. Расчёт методом многократных отражений двухслойных кривых η_k потенциал-зондирования при горизонтальном градиенте послойных величин ρ_1, ρ_2 и η_1, η_2	
Глава 5. О методах решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ	
5.1. Развитие алгоритмов решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ.	
5.2. Основы палеточных методов решения обратных задач ВЭЗ и ВЭЗ-ВП на ЭВМ	
5.2.1. О связи координат эквивалентных точек кривых η_k и ρ_k	
5.2.2. О введении параметра поляризационной восприимчивости (ψ) и его связи с коэффициентом поляризуемости (η)	
5.2.3. Об эквивалентности кривых поляризуемости η_k и палетках ВЭЗ-ВП	
5.3. Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП с помощью палеток поляризационной восприимчивости	
Глава 6. Интерпретация кривых ВЭЗ-ИЛРП и ВЭЗ-ВП (ИЛРП) при суммарном угле наклона геоэлектрической границы и дневного рельефа не более 5 - 8 градусов	
6.1. Интерпретация кривых ВЭЗ-ИЛРП	
6.2. Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП (ИЛРП)	
Глава 7. Геологическая интерпретация результатов малоуглубинной электроразведки методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач	
7.1. О комплексе задач, решаемых методами ВЭЗ и ВЭЗ-ВП	
7.2. О результатах работ методом ВЭЗ-ИЛРП на участке "Стадион" в г. Щелково	
7.3. О результатах работ методами ВЭЗ-ВП и ВЭЗ на Неро-Озёрском участке в Нечернозёмной зоне	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ЛИТЕРАТУРА	
ОГЛАВЛЕНИЕ.	