

ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ  
ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ СО РАН

**В.С.Могилатов, А.К.Захаркин, А.В.Злобинский**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ЗСБ.  
СИСТЕМА «ПОДБОР»**

Научный редактор  
доктор г.-м. наук, профессор Н.О.Кожевников

**НОВОСИБИРСК, 2006**

Введение .....	4
1 Анализ и выбор математических алгоритмов для процесса интерпретации данных	
ЗСБ 5	5
1.1 Возбуждение горизонтальным токовым листом .....	5
1.1.1 Пример 1. Токовая петля – индуктивный источник .....	8
1.1.2 Пример 2. Заземленная линия – смешанный источник .....	9
1.2 Два способа решения задачи о становлении. $N$ -слоистая среда .....	11
1.3 Некоторые частные случаи .....	13
1.3.1 Становление поля в однородном полупространстве .....	14
1.3.2 Двухслойный разрез .....	14
1.3.3 Переходный процесс в присутствии $S$ -плоскости .....	16
1.3.4 Релаксация поля в пачке $S$ -плоскостей .....	17
1.3.5 Становление поля в присутствии идеального проводника .....	18
1.3.6 Поздняя стадия ТЕ-процесса во многослойной среде .....	19
1.4 Линеаризация .....	20
1.4.1 Базовая модель и метод вторичных источников .....	21
1.4.2 Интегральное уравнение и борновское приближение .....	21
1.4.3 Интегральное представление производных по параметрам базовой модели	22
1.4.4 Быстрое приближенное моделирование задач установления различной	23
размерности	23
1.4.5 Отклик, как поле мгновенного распределения токов в среде .....	26
1.5 Решение Тихонова задачи о становлении электромагнитного поля .....	26
1.5.1 О способах решения задачи становления .....	27
1.5.2 Магнитная мода в многослойной среде .....	28
1.5.3 Редукция к задаче Штурма-Лиувилля и ее решение .....	29
2 Система Подбор .....	32
2.1 Алгоритмические особенности системы Подбор .....	32
2.2 Комплекс Подбор для операционной системы DOS .....	35
2.2.1 Задачи, которые можно решать в комплексе Подбор .....	36
2.2.2 Программа Подбор .....	37
2.2.3 Программа Профиль .....	39
2.2.4 Программа Fast3D .....	41
2.2.5 Программа Слой .....	43
2.2.6 Выводы по применению комплекса Подбор (DOS) .....	44
2.3 Система Подбор для операционной системы Windows .....	45
2.3.1 Общее описание .....	45
2.3.2 Окно площадной отрисовки .....	46
2.3.3 Окно профильной визуализации .....	60
2.3.4 Обработка пикетов площади .....	68
2.3.5 Работа с файлами .....	71
2.3.6 Представление данных .....	73
2.3.7 Форматы файлов, используемые системой .....	83
3 Практическое применение системы Подбор .....	87
3.1 Методические рекомендации или, что должен знать пользователь, приступая к	
интерпретации полевых данных .....	87
3.1.1 Некоторые предварительные замечания .....	87
3.1.2 Различные аспекты проблем эквивалентности .....	90
3.1.3 Стартовая модель среды .....	112
3.1.4 Подбор среды - действия в Системе .....	114
3.1.5 Исследовательская работа с Системой .....	120

3.2	Примеры проведения работ .....	123
3.2.1	Работы на Татарском своде.....	123
3.2.2	Результаты переинтерпретации данных электроразведки ЗСБ на Собинском участке (Сибирская платформа, Катангская седловина). ....	124
3.2.3	Результаты работ ЗСБ в Катангской седловине на Ереминской площади 125	125
3.2.4	Пример работ ЗСБ в Приенисейском прогибе .....	125
3.2.5	Йемен, 1997. Участок Warazan .....	126
	Заключение .....	133
	Литература.....	134

## Введение

Необходимость в этой книге возникла уже давно. Система математического обеспечения зондирований становлением в ближней зоне (ЗСБ) «Подбор» возникла еще на рубеже 80-90-ых годов как один из первых такого рода программных продуктов для персонального компьютера. За прошедшие более чем пятнадцать лет Система совершенствовалась, адаптировалась к развивающейся программной среде ПК и поддерживается в настоящее время усилиями изначальных авторов-разработчиков. За эти годы произошло порядка полусотни внедрений этого признанного матобеспечения в производственную практику. Разумеется, авторы сопровождают программы соответствующими инструкциями и методическими рекомендациями. Однако полного описания математических алгоритмов и самого программного продукта (в особенности, уже новых версий для среды Windows) до сих пор не появлялось. Накоплен также большой опыт по применению системы Подбор, который не фиксировался систематически. Эта работа систематизирует весь материал, относящийся к использованию системы Подбор, а также освещает многие вопросы современной методики ЗСБ.

В главе 1 излагается математический аппарат, использованный в системе Подбор. Речь идет о прямом (одномерном) моделировании, но также и об оперативных средствах не одномерного моделирования и инверсии. Математический аппарат, на взгляд самих авторов, интересен двумя особенностями. Авторы весьма настойчиво различают в процессе установления электромагнитного поля в земле два типа процессов. Первый возбуждается индуктивно, посредством магнитного поля проводника с током (индуктивный процесс, поле магнитного типа, Н-поле, магнитная мода, Н-мода, *transverse electric-TE*). Второй возбуждается с поверхности земли посредством заземления (гальванический процесс, поле электрического типа, Е-поле, электрическая мода, Е-мода, *transverse magnetic-TM*). Поскольку физической основой ЗСБ является процесс установления поля магнитного типа, то излагаемый математический аппарат более подробен именно в этой области. Вторая особенность состоит в развитии и использовании решения Тихонова. Это решение позволило нам обеспечить систему Подбор быстрой процедурой для прямой задачи в те годы, когда ПК были еще очень слабы.

Во второй главе приводится описание системы Подбор, как развивающегося на протяжении пятнадцати лет матобеспечения, так и современного его состояния. Разумеется, описываются состав Системы и функциональные возможности. Много внимания (как и в самой Системе) уделяется вопросам хранения, визуализации и документирования данных и результатов процессинга.

В третьей главе приводятся методические рекомендации по работе с системой Подбор и примеры использования Системы при интерпретации данных конкретных работ электроразведкой ЗСБ в различных районах Восточной Сибири, в Татарстане и в Йемене. Читатель, конечно, согласится, что методические рекомендации по использованию Системы неотделимы от методических проблем самого метода ЗСБ и эти проблемы (эквивалентность, стартовая модель среды, детальность расчленения разреза) затронуты достаточно глубоко на основании существенного личного опыта авторов. Наконец, авторы настойчиво напоминают (если в этом есть необходимость), что система Подбор есть средство весьма реалистичного моделирования для метода ЗСБ и позволяет исследовать роль каждого параметра (установки, формы импульса, модели среды) в процессе зондирований. В принципе, оценить эффективность и целесообразность проведения работ методом ЗСБ и спроектировать их.

# 1 Анализ и выбор математических алгоритмов для процесса интерпретации данных ЗСБ

Первая глава посвящена теоретическим основам, на которые опирается интерпретация данных ЗСБ. Собственно, это теория индуктивной импульсной электроразведки. Теория эта в общих чертах считается достаточно завершенной и излагалась много раз в отечественных и зарубежных учебниках и монографиях (например, [3], [7], [11], [17], [36]). Однако в процессе алгоритмического наполнения современного программного комплекса обработки и интерпретации данных ЗСБ приходится решить ряд задач по адаптации, оптимизации и развитию известных математических решений. Мы должны получить средства весьма оперативного одномерного анализа, но также достаточно оперативные возможности и трехмерного подхода. Мы намерены также дополнить математический аппарат средствами анализа эффективности применения различных модификаций ЗСБ в данных условиях (анализ чувствительностей, вклады в сигнал от отдельных частей разреза).

В рассматриваемом здесь математическом аппарате режим источника предусматривается произвольный во времени, но синхронный во всех точках распределения стороннего тока. Решения для режима становления предлагаются в виде интеграла Фурье, а также способом (в квазистационарном приближении, при ограничениях на проводимость основания), предложенным Тихоновым, суть которого состоит в сведении задачи к задаче Штурма-Лиувилля и аналитическом решении ее, а результат представляется в виде ряда Фурье. Развитие этого способа решения задачи становления является важной частью предлагаемой в главе 1 теории.

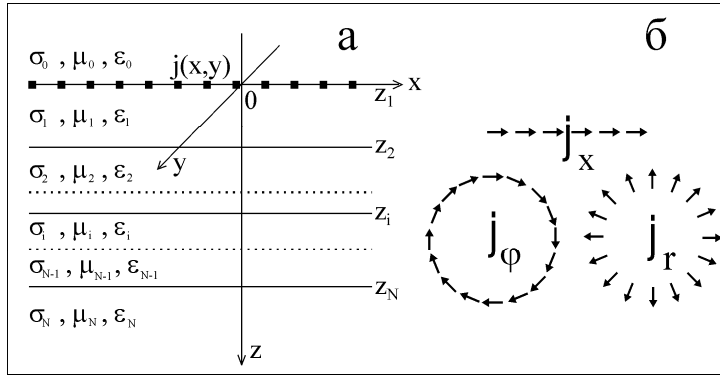
## 1.1 Возбуждение горизонтальным токовым листом

Рассмотрим распределение поверхностной плотности (именно, **поверхностной**, в А/м !) стороннего тока, меняющегося синхронно –  $\mathbf{j}^{cm}(x,y)q(t)$ , располагаемого на любой (фактической или фиктивной) границе горизонтально-слоистого разреза. Этой границей может быть дневная поверхность или другая горизонтальная плоскость выше или ниже дневной поверхности. Такое описание источника включает в себя традиционные питающие установки, образованные отрезками провода и точечными заземлениями, но также и менее привычные установки с распределенными проводниками и заземлениями. Например, для основных источников в наземной электроразведке – горизонтальный электрический диполь (ГЭД или линия – ГЭЛ) и петля поверхностная плотность определяется следующим образом:

$$\text{ГЭЛ} \quad \rightarrow \quad j_x^{cm}(x,y) = I \cdot \delta(y) \cdot [U(x + dx_0/2) - U(x - dx_0/2)],$$

$$\text{петля} \quad \rightarrow \quad j_\phi^{cm}(r) = I \cdot \delta(r - a),$$

где  $U(x)$  - функция Хевисайда,  $\delta(x)$  - дельта-функция Дирака,  $dx_0$  - длина ГЭЛ,  $a$  - радиус токовой петли. Заметим, что допущение синхронности изменения тока в каждой точке источника может быть физически некорректным при рассмотрении сверхвысоких частот (при необходимости учета токов смещения и конечной скорости распространения). Примем одномерную кусочно-однородную геоэлектрическую модель, изображенную на рис.1.1. Каждый слой изотропен. Ось  $z$  направлена вниз. Итак, в каждом однородном слое ( $i = 0, 1, \dots, N$ ) мы должны решить однородную систему уравнений Максвелла:



**Рис 1.1**

На границах между слоями непрерывны горизонтальные компоненты поля ( $H_x$ ,  $H_y$ ,  $E_x$ ,  $E_y$ ). На границе ( $z = z_l$ ), в плоскости которой содержится поверхностный сторонний ток, должны выполняться особые условия, являющиеся следствием первого уравнения (1.1) (если в него добавить сторонний ток):

$$\begin{aligned} [H_x] \Big|_{z=z_l} &= -j_y^{cm}(x,y) \cdot q(t), \\ [H_y] \Big|_{z=z_l} &= j_x^{cm}(x,y) \cdot q(t), \\ [E_x] \Big|_{z=z_l} &= 0, \\ [E_y] \Big|_{z=z_l} &= 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь и далее  $[F]$  обозначает скачок функции  $F$ , а  $[F] \Big|_{z=z_l}$  - скачок при переходе границы  $z = z_l$ . Заметим, что, принимая условия (1.5) в таком виде, мы пренебрегаем влиянием материального носителя стороннего тока, как части геоэлектрической среды.

Скаляризация задачи (1.1)–(1.5) может быть произведена если выразить горизонтальные компоненты через вертикальные (такой способ скаляризации использован, например, в [27], можно заметить также, что это близко к решению, предложенному Бромвичем [2]). Из уравнений (1.1) – (1.4) получаем следующие выражения горизонтальных компонент через вертикальные:

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \sigma_i E_z + \varepsilon_i \frac{\partial E_z}{\partial t}, \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu_i \frac{\partial H_z}{\partial t}, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} = -\frac{\partial H_z}{\partial z}, \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = -\frac{\partial E_z}{\partial z}. \quad (1.9)$$

Поставим теперь задачу для  $E_z$  и  $H_z$ . Они должны в каждом слое удовлетворять уравнению

$$\Delta F = \mu_i \sigma_i \frac{\partial F}{\partial t} + \mu_i \varepsilon_i \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}, \quad F = E_z, H_z, \quad (1.10)$$

При переходе границ ( $z = z_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ ), учитывая условия (1.5) – (1.9), имеем:

$$\left[ \sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \right] = \left[ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right] = \begin{cases} \operatorname{div} \vec{j}^{cm} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\left[ \frac{\partial E_z}{\partial z} \right]_{z=z_i} = 0, \quad (1.12)$$

$$[\mu H_z]_{z=z_i} = 0, \quad (1.13)$$

$$\left[ \frac{\partial H_z}{\partial z} \right] = - \left[ \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right] = \begin{cases} \operatorname{rot}_z \vec{j}^{cm} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases} \quad (1.14)$$

К условиям (1.10) – (1.14) необходимо также добавить условия излучения для функций  $E_z, H_z$ .

Теперь можно заметить, что уже получен важный результат. Проблема с произвольным плоским источником разделена на две независимые задачи для скалярных функций, которые совершенно по-разному зависят от заданного распределения стороннего тока.

Решаем эти задачи разделением переменных. Поскольку распределение  $\vec{j}^{cm}(x, y)$  пока произвольно, используем двухмерное преобразование Фурье по координатам  $x$  и  $y$ , которое определяется следующим образом:

$$f(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\xi, \eta, z) e^{i\xi x} e^{i\eta y} d\xi d\eta, \quad (1.15)$$

$$f^*(\xi, \eta, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z) e^{-i\xi x} e^{-i\eta y} dx dy. \quad (1.16)$$

Если задача обладает осевой симметрией (когда функция  $f$  зависит только от  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , а  $f^*$  - только от  $\lambda = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ ), пара двойных преобразований Фурье эквивалентна паре преобразований Ганкеля:

$$f(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} f^*(\lambda, z) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda, \quad (1.17)$$

$$f^*(\lambda, z) = 2\pi \int_0^{\infty} f(r, z) J_0(\lambda r) r dr. \quad (1.18)$$

Двойное преобразование Фурье удобно здесь для построения теории, практически же, в каждом конкретном случае, по причине одномерности среды, всегда можно обойтись одномерным преобразованием Ганкеля.

Нетрудно видеть, что определяя

$$\begin{aligned} E_z^*(z, t, \xi, \eta) &= V(z, t, \lambda) D^*(\xi, \eta), \\ H_z^*(z, t, \xi, \eta) &= X(z, t, \lambda) R^*(\xi, \eta), \end{aligned} \quad (1.19)$$

где

$$D^* = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{div} \vec{j}^{cm}(x, y) e^{-i\xi x} e^{-i\eta y} dx dy, \quad (1.20)$$

$$R^* = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{rot} \vec{j}^{cm}(x, y) e^{-i\xi x} e^{-i\eta y} dx dy, \quad (1.21)$$

мы сводим задачу к нахождению двух совершенно независимых друг от друга и от конфигурации источника функций  $X$  и  $V$ , которые в каждом ( $i=0, 1, \dots, N$ ) однородном слое

удовлетворяют одному и тому же уравнению, но разным условиям на границах ( $z = z_i, i = 1, 2, \dots, N$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} - \lambda^2 \cdot F &= \mu_i \sigma_i \frac{\partial F}{\partial t} + \mu_i \varepsilon_i \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}, \quad i = 0, 1, \dots, N, \quad F = X, V, \\ \text{а) для функции } X & \quad \text{б) для функции } V \\ [\mu X]_{z=z_i} &= 0, \quad \left[ \sigma V + \varepsilon \frac{\partial V}{\partial t} \right] = \begin{cases} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases}, \quad (1.22) \\ [X'_z] &= \begin{cases} q(t), & i = l \\ 0, & i \neq l \end{cases}, \quad [V'_z]_{z=z_i} = 0, \\ X \rightarrow 0, & V \rightarrow 0, \quad |z| \rightarrow \infty. \end{aligned}$$

Эти краевые задачи мы будем решать ниже. Сейчас обсудим общий вид решения (Фурье-образ) для всех компонент. Применяя преобразование Фурье к равенствам (1.6)-(1.9) и выражая образы горизонтальных компонент через образы вертикальных, получим, что в каждом слое

$$H_x^* = \bar{\eta} (\sigma_i V + \varepsilon_i \dot{V}) D^* + \bar{\xi} X'_z R^*, \quad (1.23)$$

$$H_y^* = -\bar{\xi} (\sigma_i V + \varepsilon_i \dot{V}) D^* + \bar{\eta} X'_z R^*, \quad (1.24)$$

$$H_z^* = X R^*, \quad (1.25)$$

$$E_x^* = \bar{\xi} V'_z D^* - \bar{\eta} \mu_i \dot{X} R^*, \quad (1.26)$$

$$E_y^* = \bar{\eta} V'_z D^* + \bar{\xi} \mu_i \dot{X} R^*, \quad (1.27)$$

$$E_z^* = V D^*, \quad (1.28)$$

где  $\bar{\xi} = \frac{i\xi}{\lambda^2}$ ,  $\bar{\eta} = \frac{i\eta}{\lambda^2}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N$ .

Таким образом, поведение поля со временем описывается двумя независимыми функциями  $V$  и  $X$  разного типа, производящими Е- и Н-моды. Иначе говоря, процесс установления поля произвольного источника есть суперпозиция двух различных процессов (ТМ и ТЕ). Вклад каждого процесса определяется коэффициентами  $D^*$  и  $R^*$ , т.е., согласно (1.20) и (1.21), конфигурацией источника (стороннего тока) посредством функций  $\text{div} \mathbf{j}^{cm}(x, y)$  и  $\text{rot}_z \mathbf{j}^{cm}(x, y)$ . Одна составляющая определяется током, стекающим (втекающим) с заземлений (возбуждается гальваническим путем), а другая составляющая зависит от вихревой компоненты в распределении стороннего тока (возбуждается индуктивным путем). Пользуясь полученным представлением решения для произвольного источника, можно целенаправленно изменять конфигурацию источника, добиваясь подавления гальванической компоненты или индуктивной. Впрочем, подавление гальванической составляющей процесса, причем, полное (всюду  $\text{div} \mathbf{j}^{cm} = 0$ ), давно известно и применяется – это незаземленный контур с током.

### 1.1.1 Пример 1. Токовая петля – индуктивный источник

Возьмем такой особый случай, как распределение стороннего (поверхностного, в А/м) тока с азимутальной симметрией. Здесь также имеется много возможностей, но мы примем, что в полярной системе координат имеется только  $j_\varphi^{cm}(r)$ , причем  $j_\varphi^{cm}(r) = I \cdot \delta(r - a)$ . Это значит, что рассматривается круглая (радиус  $a$ ) токовая петля. Итак, в цилиндрической системе координат получается:



$$\operatorname{div} \mathbf{j}^{cm} = \frac{1}{r} \frac{\partial j_{\varphi}^{cm}}{\partial \varphi} = 0, \quad (1.29)$$

$$\operatorname{rot}_z \mathbf{j}^{cm} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r j_{\varphi}^{cm})}{\partial r} = I \cdot [\delta(r-a)/r + \delta'(r-a)]. \quad (1.30)$$

Следовательно,  $D^* = 0$  и этот источник – чисто индуктивный (конечно, мы это подозревали).

Что касается функции  $R^*$ , то, используя азимутальную симметрию, переходя от преобразований Фурье (1.15) и (1.16) к преобразованиям Ганкеля (1.17) и (1.18) и учитывая определение дельта-функции Дирака и ее производных, получим

$$R^* = 2\pi I \int_0^{\infty} [\delta(r-a)/r + \delta'(r-a)] J_0(\lambda r) r dr = 2\pi I \cdot \lambda a J_1(\lambda a). \quad (1.31)$$

Нетрудно видеть, учитывая (1.23) – (1.28), что в цилиндрической системе координат отличны от 0 компоненты  $H_r$ ,  $H_z$  и  $E_{\varphi}$ . Например, компонента  $E_{\varphi}$  в  $i$ -ом слое представляется в следующем виде:

$$E_{\varphi}(r, z, t) = \frac{M_z \mu_i}{\pi a} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda \frac{\partial X(z, t, \lambda)}{\partial t} d\lambda, \quad (1.32)$$

где  $M_z = I \cdot \pi \cdot a^2$  – определяется, как момент источника. В теории обычно рассматривается петля бесконечно малого радиуса, но с конечным моментом – вертикальный магнитный диполь (ВМД). В этом случае  $J_1(\lambda a) \approx \lambda a/2$  и (1.32) примет вид

$$E_{\varphi}(r, z, t) = \frac{M_z \mu_i}{2\pi} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) \cdot \lambda^2 \frac{\partial X(z, t, \lambda)}{\partial t} d\lambda. \quad (1.33)$$

### 1.1.2 Пример 2. Круговой электрический диполь - гальванический источник

Построим теперь для иллюстрации такой источник, который возбуждал бы поле только электрического типа. Мы должны потребовать, чтобы  $R^* \equiv 0$  или на всей плоскости  $z = 0$  (в полярной системе координат)

$$\operatorname{rot}_z \vec{j}^{cm} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial (r j_{\varphi}^{cm})}{\partial r} - \frac{\partial j_r^{cm}}{\partial \varphi} \right] = 0. \quad (1.34)$$

Очевидное решение – это осесимметричное распределение стороннего тока, имеющего только радиальную компоненту  $j_r^{cm}(r)$ . Пусть плотность стороннего тока отлична от 0 только вблизи окружности радиуса  $r_0$  (рис.1.1), т. е.

$$j_r^{cm}(r) = \frac{I dr_0}{2\pi r_0} \cdot \delta(r - r_0), \quad (1.35)$$

где  $I$  – полный ток. Будем называть такой источник круговой электрический диполь (КЭД). Далее,

$$D^*(\lambda) = I dr_0 \cdot \lambda J_1(\lambda r_0), \quad (1.36)$$

и мы получим следующие выражения для ненулевых компонент поля КЭД в  $i$ -м слое:

$$H_{\varphi}(r, z, t) = -\frac{I dr_0}{2\pi} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) J_1(\lambda r_0) \left[ \sigma_i V(z, t, \lambda) + \varepsilon_i \frac{\partial V(z, t, \lambda)}{\partial t} \right] \lambda d\lambda, \quad (1.37)$$

$$E_r(r, z, t) = -\frac{Idr_0}{2\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda r_0) \frac{\partial V(z, t, \lambda)}{\partial z} \lambda d\lambda, \quad (1.38)$$

$$E_z(r, z, t) = \frac{Idr_0}{2\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) J_1(\lambda r_0) V(z, t, \lambda) \lambda^2 d\lambda. \quad (1.39)$$

Таким образом, поле КЭД ортогонально полю петли. Поле петли поперечно-электрическое или ТЕ-поле и, значит, поле КЭД - поперечно-магнитное или ТМ-поле. Отметим замечательную особенность поля КЭД. Как следует из выражения для компоненты  $H_\varphi$ , в воздухе ( $\sigma_0 = 0$ ) квазистационарный магнитный отклик горизонтально-слоистой среды отсутствует.

### 1.1.3 Пример 2. Заземленная линия – смешанный источник

Рассмотрим и такой классический источник электромагнитного поля в электроразведке, как заземленная горизонтальная электрическая линия или диполь. Например, короткую линию с током  $I$ , заземленную в точках по оси  $x$  при  $x = -dx_0/2$  и при  $x = dx_0/2$ . Таким образом, сторонний (поверхностный, в А/м) ток имеет только компоненту  $j_x^{cm}$ , причем

$$j_x^{cm}(x, y) = I \cdot \delta(y) \cdot [U(x + dx_0/2) - U(x - dx_0/2)].$$

Или для диполя с моментом  $Idx_0$ :

$$j_x^{cm}(x, y) = Idx_0 \cdot \delta(y) \cdot \delta(x).$$

Тогда

$$\text{div } \mathbf{j}^{cm} = Idx_0 \cdot \delta(y) \cdot \delta'(x), \quad (1.40)$$

$$\text{rot}_z \mathbf{j}^{cm} = -Idx_0 \cdot \delta'(y) \cdot \delta(x). \quad (1.41)$$

Затем определяем

$$D^* = Idx_0 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(y) \delta'(x) e^{-i\xi x} e^{-i\eta y} dx dy = Idx_0 \cdot i\xi, \quad (1.42)$$

$$R^* = -Idx_0 \cdot i\eta. \quad (1.43)$$

Наконец, согласно (1.23) – (1.28) и (1.15) – (1.18), получаются выражения для всех компонент нестационарного поля горизонтального электрического диполя:

$$\begin{aligned} H_x &= Idx_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \mathfrak{G}(\sigma_i V + \varepsilon_i \dot{V} - X'_z), \\ H_y &= -Idx_0 \cdot \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathfrak{G}(\sigma_i V + \varepsilon_i \dot{V}) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathfrak{G}(X'_z) \right], \\ H_z &= Idx_0 \cdot \frac{\partial}{\partial y} \mathfrak{G}(\lambda^2 X), \\ E_x &= Idx_0 \cdot \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathfrak{G}(V'_z) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathfrak{G}(\mu_i \dot{X}) \right], \\ E_y &= Idx_0 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \mathfrak{G}(V'_z - \mu_i \dot{X}), \\ E_z &= -Idx_0 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \mathfrak{G}(\lambda^2 V), \end{aligned} \quad (1.44)$$

где  $\mathfrak{G}$  – интегральный оператор

$$\mathcal{G}(F) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) \frac{f(\lambda)}{\lambda} d\lambda,$$

а функции  $X$ ,  $V$  удовлетворяют краевым задачам (1.22). Само по себе, такое представление поля ГЭД (в виде суперпозиции полей магнитного и электрического типов) позволяет сделать ряд полезных заключений о характере процесса становления поля ГЭД.

Мы обратим внимание на то, что все компоненты, кроме  $E_z$ , содержат вклад поля магнитного типа (индуктивную составляющую), а это значит, что в поздней стадии ГЭД можно считать фактически индуктивным источником, близким по свойствам идеальному индуктивному источнику - петле, поскольку индуктивный процесс затухает гораздо медленнее гальванического.

Как видно, измеряя компоненту  $H_z$ , чисто индуктивную, мы должны будем характеризовать нашу методику, как индуктивную импульсную электроразведку.

Следующий вывод можно сделать на основании выражений для горизонтальных магнитных компонент  $H_x$  и  $H_y$ . Видно, что в воздухе в квазистационарном приближении эти компоненты, как и вертикальная, определяются только магнитной модой. Таким образом, любые измерения магнитного поля, возбуждаемого линией с током, на дневной поверхности и выше методически тяготеют к индуктивной электроразведке.

Исходя из целей и задач данной работы, посвященной индуктивной импульсной электроразведке, нам следует изучать решение только для магнитной моды.

## 1.2 Два способа решения задачи о становлении. $N$ -слойная среда

Краевые задачи (1.22) решаем, продолжая разделять переменные. Мы будем, как сказано, интересоваться только функцией  $X$ , которую ищем как суперпозицию решений вида  $Z(z) \exp(-\alpha t)$ , где  $\operatorname{Re} \alpha \leq 0$ . Функцию  $Z$  определим как  $Z(z) = A\zeta(z)$  над границей со сторонним током ( $z \leq z_1$ ) и  $Z(z) = B\zeta(z)$  под границей. Функция  $\zeta$  в  $i$ -ом слое может быть выражена через свои же значения на нижней или на верхней границе слоя (изнутри слоя). Обозначая  $\zeta_i = \zeta(z_i)$ ,  $\zeta_i' = \zeta_i'(z_i)$ , ( $i=1,2,\dots,N$ ), имеем в каждом слое ( $z_i \leq z \leq z_{i+1}$ , ось  $z$  направлена вниз):

$$\begin{aligned} \zeta(z) &= \zeta_1 \cdot \exp[u_0(z - z_1)], & z \leq z_1, & \quad (\text{в воздухе}), \\ \zeta(z) &= \zeta_i \cdot \operatorname{ch}[u_i(z - z_i)] + \frac{\zeta_i'}{u_i} \cdot \operatorname{sh}[u_i(z - z_i)], \end{aligned} \quad (1.45)$$

или, выражая через значения на нижней границе,

$$\begin{aligned} \zeta(z) &= \zeta_{i+1} \cdot \operatorname{ch}[u_i(z - z_{i+1})] + \frac{\zeta_{i+1}'}{u_i} \cdot \operatorname{sh}[u_i(z - z_{i+1})], \\ \zeta(z) &= \zeta_N \cdot \exp[-u_N(z - z_N)], & z \geq z_N. \end{aligned} \quad (1.46)$$

Здесь  $u_i^2 = \lambda^2 + k_i^2$ ,  $k_i^2 = -\alpha \mu_i \sigma_i + \alpha^2 \mu_i \varepsilon_i$ , ( $i=0,1,\dots,N$ ). При переходе границы между слоями непрерывны функции

$$f = \mu \zeta, \quad h = \zeta'_z. \quad (1.47)$$

Формулы (1.45)-(1.47) отражают знаменитый рекуррентный механизм расчетов поля в слоистой среде.

На этом этапе следует уточнить вид параметра  $\alpha$ . Обычно его берут в виде  $i\omega$ , где  $\omega$  пробегает непрерывный ряд значений, и функция  $X$  представится интегралом Фурье:

$$X = \mathcal{F}(Z) \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q(\omega) Z(z) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (1.48)$$

Функция  $Q(\omega)$  есть трансформанта функции, описывающей форму возбуждающего импульса, т.е.,  $q(t) = \mathcal{F}(Q)$ . Для мгновенного включения имеем, в частности,  $Q(\omega) = 1/(-i\omega)$ . Если  $q(t) = \exp(-i\omega_0 t)$  (т.е.  $Q(\omega) = 2\pi\delta(\omega - \omega_0)$ ), мы получаем гармоническое решение для частоты  $\omega_0$ . Находим функцию  $Z$ , имея источник на границе  $z = z_l$ , ( $1 \leq l \leq N$ ) и определяя коэффициенты  $A$  и  $B$  с учетом условий при  $z = z_l$  после преобразования (1.48) краевых задач (1.22):

$$Z(z) = - \left( \frac{\overset{\sim}{f}}{f_l h_l - \overset{\sim}{f}_l h_l} \right) \cdot \zeta(z), \quad z \leq z_0 \text{ (над источником)}, \quad (1.49)$$

$$Z(z) = - \left( \frac{\overset{\sim}{f}}{f_l h_l - \overset{\sim}{f}_l h_l} \right) \cdot \zeta(z), \quad z \leq z_0 \text{ (над источником)}. \quad (1.50)$$

Здесь акцент ( $\overset{\sim}{f}$ ) означает, что функция определяется над источником, последовательно сверху вниз по формулам (1.45)-(1.46), причем, значение  $\zeta_1$  (на верхней стороне первой границы) произвольно. Соответственно, акцент ( $\overset{\sim}{f}$ ) означает, что функция определяется снизу, с нижней стороны последней границы.

Фактически, мы здесь в несколько необычной последовательности в разделении переменных использовали обычный способ решения задачи о становлении, известный как "решение в частотной области". Наиболее основательно он был предложен в [38] и получил большое развитие в дальнейшем (например, [3], [36]). Проблемы численной реализации этого алгоритма решены, но только в квазистационарном приближении. При учете токов смещения возможность численной реализации преобразования Фурье резко ухудшается.

В квазистационарном приближении можно предложить и другое решение краевых задач (1.22), которое впервые использовал А.Н. Тихонов в [35]. Дадим его здесь в весьма сжатой форме. Итак, если токами смещения пренебречь и принять верхнее (воздух) и нижнее подстилающее полупространства изолирующими, то решение в этих областях для функции  $X(z, t)$  есть

$$F(z, t) = F(z_1, t) \cdot \exp[\lambda(z - z_1)] \quad (1.51)$$

в верхнем полупространстве и

$$F(z, t) = F(z_N, t) \cdot \exp[-\lambda(z - z_N)] \quad (1.52)$$

в нижнем, и квазистационарная задача для  $X$  ограничивается по  $z$  ( $z_1 \leq z \leq z_N$ ) путем замены граничных условий при  $z = z_1$  и  $z = z_N$  замыкающими условиями связи функции и производной. Сначала решаем задачу для режима выключения ( $q(t) = 1 - U(t)$ ), сводя к задаче с начальным условием. При этом получим вместо (1.22) следующую задачу для функций  $X$  (внутри области  $z_1 \leq z \leq z_N$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} - \lambda^2 X &= \mu_i \sigma_i \frac{\partial X}{\partial t}, \quad z_i < z < z_{i+1}, \quad i = 1, \dots, N-1, \\ X'_z - \lambda \frac{\mu_1}{\mu_0} X &= 0, \quad z = z_1, \\ [\mu X]_{z=z_i} &= 0, \quad [X'_z]_{z=z_i} = 0, \quad z = z_2, \dots, z_{N-1}, \\ X'_z + \lambda \frac{\mu_{N-1}}{\mu_N} X &= 0, \quad z = z_N, \\ X &= \bar{X}(\lambda, z), \quad t = 0, \end{aligned} \quad (1.53)$$

где  $\bar{X}(\lambda, z)$  - решение для постоянного тока. Заметим, что начальным условием для функции  $X$  является распределение (Фурье-образ) магнитного поля постоянного стороннего тока. По-прежнему предполагается, что источник расположен на границе  $z=z_l$ , которая является одной из границ разреза  $z=z_i$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ ).

В этом случае параметр  $\alpha$  может принимать дискретный набор вещественных значений  $\alpha_j \geq 0$  и решение для функции  $X$  представляется в виде ряда Фурье:

$$X = \sum_{j=0}^{\infty} C_j \cdot \zeta_j(z) \cdot T_j(t), \quad (1.54)$$

где  $T_j = \exp(-\alpha_j t)$  для мгновенного выключения. Если же ток в источнике меняется, как  $q(t)$ , то

$$T_j(t) = - \int_{-\infty}^t q(\tau) \cdot \alpha_j \cdot \exp[-\alpha_j(t - \tau)] \cdot d\tau.$$

Функции  $\zeta_j$  последовательно определяем сверху вниз, положив  $\zeta_{j1}=1$ , с учетом (1.45) и удовлетворяя граничным условиям в (1.53). Условие на нижней границе является уравнениями для определения  $\alpha_j$ . В случае сверхпроводящего основания условие на нижней границе для функции  $X$  есть  $\zeta_{jN}=0$ .

Коэффициенты  $C_j$  определяем при удовлетворении начальных условий для функции  $X$ , и пользуясь ортогональностью функций  $\mu\sqrt{\sigma}\zeta_j$  в области  $z_1 \leq z \leq z_N$ . Также мы учитываем, что функция  $\bar{X}(\lambda, z)$  удовлетворяет уравнению  $F_{zz}''' - \lambda^2 F = 0$  и тем же условиям на границах, что и функция  $X$ . Итак,

$$C_j = \frac{f_{ij}}{\alpha_j \cdot \sum_{i=1}^{N-1} M_{ij} \mu_i^2 \sigma_i}, \quad (1.55)$$

где в каждом слое определяется

$$M_{ij} = \int_{z_i}^{z_{i+1}} [\zeta(z)]^2 dz = \frac{1}{2u_{ij}^2} \{ d_i [\zeta_{ji}^2 u_{ji}^2 - (\zeta'_{ji})^2] + (\zeta_{ji+1} \zeta'_{ji+1} - \zeta_{ji} \zeta'_{ji}) \},$$

функции  $f$  и  $\zeta$  определены формулами (1.45)-(1.47),  $d_i = z_{i+1} - z_i$  - мощности слоев ( $i=1, 2, \dots, N-1$ ).

Заметим, что  $u_{ij} = \sqrt{\lambda^2 - \alpha_j \mu_i \sigma_i}$  может принимать мнимые значения, тогда вещественное гиперболическое решение (1.45)-(1.46) переходит в вещественное же тригонометрическое решение. Вещественная арифметика этого алгоритма позволяет создать весьма быстрые численные процедуры. Остается добавить, что функция  $X$  определена в области  $z_1 \leq z \leq z_N$ . Пользуясь общими условиями на границах в задаче (1.22) и решениями (1.51)-(1.52), можно в случае необходимости определить функцию  $X$  в верхнем и нижнем полупространствах.

Мы в весьма компактной форме привели здесь одномерный математический аппарат, с помощью которого можно построить алгоритм для расчета устанавливающегося поля произвольного источника на дневной поверхности (или на любой другой границе), притом, двумя способами, совместное использование которых позволяет организовать универсальные, надежные и быстрые вычислительные процедуры, как это и реализовано в системе обработки данных ЗСБ Подбор.

### 1.3 Некоторые частные случаи

Рассмотрим отдельные простые следствия, имеющие важное значение в математическом обеспечении индуктивной электроразведки, такие как решение для однородного полупространства, двухслойная среда,  $S$ -плоскость, пачка  $S$ -плоскостей.

### 1.3.1 Становление поля в однородном полупространстве

Выражения для устанавливающегося поля вертикального магнитного диполя при ступенчатом изменении момента в однородном полупространстве хорошо известны [3] [36]. Однако эти классические решения не учитывают конечные размеры источника и произвольный импульсный режим возбуждения, что существенно для современных (малоглубинных) условий применения ИИЭ. Получим другое представление решения, более удобные для учета этих обстоятельств.

Рассмотрим выражение для неустановившегося поля круглой петли с током, расположенной на дневной поверхности однородного полупространства. В квазистационарном приближении при ступенчатом выключении тока в петле имеем:

$$E_{\varphi}(r, z, r_0, z_0, t) = \frac{\mu_0 a}{2} \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) \cdot J_1(\lambda a) \cdot Z(z, t, \lambda) \cdot d\lambda \quad (1.56)$$

Здесь:

$$Z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(z, \omega) \cdot \exp(-i\omega t) \cdot d\omega, \quad (1.57)$$

где

$$X = \frac{2\lambda \exp(-u|z|)}{\lambda + \mu}. \quad (1.58)$$

Соответственно  $u = \lambda^2 + k^2$ , а  $k^2 = -i\omega\mu\sigma$ .

Таким образом, мы записали решение в форме суперпозиции устанавливающихся пространственных гармоник. Здесь учтены конечные размеры установки путем введения множителя  $J_1(\lambda a)$ , где  $a$  - радиус генераторной петли. В этом случае не удастся найти удобное аналитическое представление для (1.56), но после замены переменных и приведения к преобразованию Лапласа интеграл (1.57) берется аналитически:

$$Z = \frac{2\lambda^2}{\mu\sigma} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \cdot \exp\left(-\tau - \frac{z^2\mu\sigma}{4t}\right) - \exp(\lambda z) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\tau} + \frac{\lambda z}{2\sqrt{\tau}}\right) \right], \quad (1.59)$$

где  $\tau = \frac{t\lambda^2}{\mu\sigma}$ , а функция  $\operatorname{erfc}$  представляется в виде:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt.$$

Решение для импульса произвольной формы можно получить, произведя свертку этого импульса с (1.59) и подставляя в (1.56).

### 1.3.2 Двухслойный разрез

Рассмотрим частный случай, когда средой является однородный пласт, подстилаемый изолирующим полупространством. Этот случай интересен тем, что здесь решение можно представить в виде однократного интеграла, что позволяет получить весьма быструю программу, которая использовалась авторами для различных трансформаций наблюдаемой кривой становления в кривые кажущихся величин. Ось  $z$  направим вниз так, что начало – на дневной поверхности. В случае токовой петли с радиусом  $a$ , помещенной на высоту  $H$  над пластом (мощность  $h$ ) с проводимостью  $\sigma$  и магнитной проницаемостью  $\mu$  решаем задачу (1.53) для функции  $X$  в области  $-H \leq z \leq h$ .

Пользуясь приведенным выше алгоритмом решения задачи (1.53) по Тихонову, получим решение после выключения (при  $t=0$ ) тока в петле:

$$X(z, t) = \sum_{j=0}^{\infty} C_j \cdot \zeta_j(z) \cdot \exp(-\alpha_j t), \quad (1.60)$$

где

$$\zeta_j = \begin{cases} \frac{\exp(\lambda z)}{\lambda}, & -H \leq z \leq 0, \\ \frac{\mu_0}{\mu \lambda} \cos(u_j z) + \frac{1}{u_j} \sin(u_j z), & 0 \leq z \leq h \end{cases},$$

$$u_j^2 = \alpha_j \mu \sigma - \lambda^2,$$

$$C_j = -\frac{\mu_0 \exp(-\lambda H)}{\alpha_j \lambda M_j \mu^2 \sigma}, \quad M_j = \frac{h(\mu_0^2 u_j^2 + \mu^2 \lambda^2) + 2\mu_0 \mu \lambda}{2u_j^2 \mu^2 \lambda^2},$$

а для  $\alpha_j$  имеем уравнение

$$\frac{\operatorname{tg}(u_j h)}{u_j} = -\frac{2\mu_0 \mu \lambda}{(\mu_0^2 u_j^2 + \mu^2 \lambda^2)}.$$

Например, компонента  $E_\varphi$  представится в следующем виде:

$$E_\varphi(r, z, t) = \frac{M_z \mu_i}{\pi a} \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda \frac{\partial X(z, t, \lambda)}{\partial t} d\lambda, \quad (1.61)$$

или

$$E_\varphi = \frac{M_z \mu_0^2}{\pi a \sigma} \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} \frac{2u_j^2 \exp[-\alpha_j t + \lambda(z-H)]}{h(\mu_0^2 u_j^2 + \mu^2 \lambda^2) + 2\mu_0 \mu \lambda} \right\} d\lambda, \quad (1.62)$$

где  $a$  - радиус петли,  $M_z = I \pi a^2$  - определяется как момент источника и  $z \leq 0$ .

Теперь сделаем замену переменной в (1.62):

$$\lambda = u \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{uh}{2}\right) \quad \text{при} \quad 2\pi j \leq uh \leq \pi(2j+1),$$

$$\lambda = -u \cdot \operatorname{ctg}\left(\frac{uh}{2}\right) \quad \text{при} \quad \pi(2j+1) \leq uh \leq 2\pi(j+1),$$

$$j = 0, 1, 2, \dots$$

и получим для компонент поля удобные для расчета выражения в виде однократных интегралов, причем, в отличие от (1.62), с прямым вычислением подынтегральной функции (положим всюду  $\mu \equiv \mu_0$ ):

$$\begin{aligned} E_\varphi &= -I \rho a \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda u \exp\left[-\frac{t \rho}{\mu_0} (u^2 + \lambda^2)\right] \exp(-2\lambda H) du, \\ H_r &= I a \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \frac{\lambda^2 u \exp\left[-\frac{t \rho}{\mu_0} (u^2 + \lambda^2)\right]}{u^2 + \lambda^2} \exp(-2\lambda H) du, \\ H_z &= -I a \int_0^\infty J_0(\lambda r) J_1(\lambda a) \frac{\lambda^2 u \exp\left[-\frac{t \rho}{\mu_0} (u^2 + \lambda^2)\right]}{u^2 + \lambda^2} \exp(-2\lambda H) du. \end{aligned} \quad (1.63)$$

Здесь источник (петля радиуса  $a$ ) и приемник подняты на высоту  $H$  над пластом.

### 1.3.3 Переходный процесс в присутствии S-плоскости

Другая простейшая модель геоэлектрической среды, сыгравшая большую методологическую роль в развитии индуктивной импульсной электроразведки, состоит в аппроксимации проводящей толщи проводящей плоскостью. Особая роль этой модели для индуктивной импульсной электроразведки обеспечивается, во-первых, свойствами ТЕ-процесса становления, по которым в поздней стадии процесс определяется лишь суммарной продольной проводимостью и безразличен к вертикальному распределению проводимости и, таким образом, совпадает с процессом становления в присутствии S-плоскости с соответствующим значением продольной проводимости. С этим связана известная "S-эквивалентность", по которой разрезы с различным вертикальным распределением проводимости при одинаковой ее суммарной величине могут дать одинаковые (практически) отклики. Во-вторых, популярность этой модели обеспечивалась также простотой математического описания процесса становления и соблазнительной легкостью вовлечения этого описания в процесс интерпретации.

Решим сначала задачу о становлении поля вертикального магнитного диполя в присутствии проводящей плоскости, как самостоятельную задачу (хотя впервые решение этой задачи приводится еще в [26]). Используем цилиндрическую систему координат с осью  $z$ , направленной вниз. ВМД с моментом  $M_z$  помещен в начало координат, а S-плоскость с продольной проводимостью  $S$  помещена на "глубине"  $h$  ( $z = h$ ). Система уравнений Максвелла для ненулевых компонент поля после отключения источника выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} &= \mu_0 \dot{H}_r, \quad \frac{1}{r} E_\varphi + \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} = -\mu_0 \dot{H}_z, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_r) + \frac{\partial H_z}{\partial z} &= 0,\end{aligned}\tag{1.64}$$

всюду, кроме точек S-плоскости. На S-границе ( $z = h$ ) должны выполняться следующие условия:

$$[E_\varphi] = 0, \quad [H_r] = S \cdot E_\varphi.\tag{1.65}$$

Определение S-плоскости и вывод этих условий даны еще в работе [38]. Для получения этих условий нужно рассмотреть первое уравнение Максвелла внутри тонкого ( $\delta h$ ) проводящего ( $\sigma$ ) слоя при тенденции:  $\delta h \rightarrow 0$ ,  $\sigma \rightarrow \infty$  так, что  $\delta h \sigma \rightarrow S$  и использовать непрерывность тангенциальных компонент поля на простых границах.

Разделяя переменные и принимая во внимание представления постоянного поля ВМД:

$$H_r = -\frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda r) \lambda^2 e^{-\lambda|z|} d\lambda = -\frac{M_z}{4\pi} \frac{3rz}{(r^2 + z^2)^{5/2}},\tag{1.66}$$

$$H_z = -\frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) \lambda^2 e^{-\lambda|z|} d\lambda = \frac{M_z}{4\pi} \frac{r^2 - 2z^2}{(r^2 + z^2)^{5/2}},\tag{1.67}$$

ищем решения в виде:



$$\begin{aligned}
H_r &= -\frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda r) \lambda^2 R(z, t, \lambda) d\lambda, \\
H_z &= -\frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) \lambda^2 Z(z, t, \lambda) d\lambda, \\
E_\varphi &= \frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty J_1(\lambda r) \lambda^2 F(z, t, \lambda) d\lambda,
\end{aligned} \tag{1.68}$$

Задача (1.64) для компонент поля отображается в следующую задачу для функций  $R, Z, F$ :

$$\begin{aligned}
R'_z + \lambda Z &= 0, \\
F'_z &= -\mu_0 \dot{R}, \quad \lambda F = \mu_0 \dot{Z}, \\
\lambda R + Z'_z &= 0,
\end{aligned} \tag{1.69}$$

всюду, исключая границу  $S$ , а на границе ( $z = h$ )

$$[F] = 0, \quad [R] = -S \cdot F.$$

Поставим задачу для функции  $Z$ :

$$\begin{aligned}
Z''_{zz} - \lambda^2 Z &= 0, \quad z \neq h, \\
[Z] = 0, \quad [Z'_z] &= -\mu_0 S \dot{Z}, \quad z = h, \\
Z(h, 0, \lambda) &= \exp(-\lambda h) \quad - \text{начальное условие.}
\end{aligned} \tag{1.70}$$

Решение ищем в виде

$$Z(z, t, \lambda) = C(\lambda) \cdot \zeta(z) \cdot e^{-\alpha t},$$

что дает следующую задачу для  $\zeta(z)$ :

$$\begin{aligned}
\zeta''_{zz} - \lambda^2 \zeta &= 0, \quad z \neq h, \\
[\zeta] = 0, \quad [\zeta'_z] &= \mu_0 S \alpha \zeta, \quad z = h,
\end{aligned}$$

Решая задачу (1.69), удовлетворяя также начальному условию в (1.70), легко получаем, что  $\alpha = \frac{2\lambda}{\mu_0 S}$  и в области  $0 \leq z \leq h$

$$Z = \exp\left[-\lambda(2h - z) - \frac{2\lambda t}{\mu_0 S}\right], \quad R = -Z, \quad F = -\frac{2}{S} \cdot Z.$$

Наконец, подставляя эти выражения в (1.68) и интегрируя, получим широко известные выражения для устанавливающегося поля  $S$ -плоскости:

$$\begin{aligned}
H_r &= \frac{M_z}{4\pi} \frac{3rm}{(r^2 + m^2)^{5/2}}, \quad H_z = \frac{M_z}{4\pi} \frac{r^2 - 2m^2}{(r^2 + m^2)^{5/2}}, \\
E_\varphi &= \frac{M_z}{4\pi S} \frac{6rm}{(r^2 + m^2)^{5/2}},
\end{aligned} \tag{1.71}$$

$$\dot{B}_r = \frac{6M_z \mu_0 r}{4\pi S} \frac{r^2 - 4m^2}{(r^2 + m^2)^{7/2}}, \quad \dot{B}_z = -\frac{6M_z \mu_0 m}{4\pi S} \frac{3r^2 - 2m^2}{(r^2 + m^2)^{7/2}},$$

где  $m = \frac{2t}{\mu_0 S} + 2h - z$  в принятой нами системе координат ( $z \leq h$ ).

### 1.3.4 Релаксация поля в пачке S-плоскостей

Решение для 2-ух плоскостей ранее приводилось (например, [21]), а становление в присутствии  $N$  проводящих плоскостей рассматривалось в [30]. Мы здесь приведем

совершенно прозрачное развитие решения для одной плоскости, полученное в предыдущем подразделе.

Итак, имеется теперь  $N$  плоскостей с параметрами  $S_i, h_i, i=1, 2, \dots, N$ . Краевая задача (1.70) для функции  $Z$  имеет теперь вид:

$$\begin{aligned} Z''_{zz} - \lambda^2 Z &= 0, z \neq h_i, \quad i=1, 2, \dots, N \\ [Z] &= 0, [Z'_z] = -\mu_0 S_i \dot{Z}, \quad z = h_i, \\ Z(h_i, 0, \lambda) &= \exp(-\lambda h_i) - \text{начальное условие.} \end{aligned} \quad (1.72)$$

Решение ищем в виде

$$Z(z, t, \lambda) = C(\lambda) \cdot \zeta(z) \cdot e^{-\alpha t} \quad (1.73)$$

что дает следующую задачу для  $\zeta(z)$ :

$$\begin{aligned} \zeta''_{zz} - \lambda^2 \zeta &= 0, z \neq h_i, \\ [\zeta] &= 0, [\zeta'_z] = \mu_0 S \alpha \zeta, z = h_i, \end{aligned} \quad (1.74)$$

Далее все очень просто. Обозначим  $\zeta_{i-}$  значение на  $i$ -ой границе "сверху", а  $\zeta_{i+}$  -- "снизу". В  $i$ -ом слое воздуха, между  $i$ -ой и  $i+1$ -ой плоскостью решение можно представить через значения функции на внутренних поверхностях границ:

$$\zeta(z) = \zeta_{i+1-} \operatorname{ch}[\lambda(z_{i+1} - z)] - \frac{\zeta'_{i+1-}}{\lambda} \operatorname{sh}[\lambda(z_{i+1} - z)] \quad (1.75)$$

или

$$\zeta(z) = \zeta_{i+} \operatorname{ch}[\lambda(z_i - z)] - \frac{\zeta'_{i+}}{\lambda} \operatorname{sh}[\lambda(z_i - z)]. \quad (1.76)$$

В нижнем полупространстве решение есть  $\zeta(z) = \zeta_{N+} \exp(-\lambda z)$ , в верхнем -  $\zeta(z) = \zeta_{1-} \exp(\lambda z)$ . Таким образом, положив, например,  $\zeta_{N+} = 1$ , далее можно последовательно определить  $\zeta(z)$  всюду, пользуясь пересчетом вверх по формуле (1.75) и условиями связи между  $\zeta_{i-}$  и  $\zeta_{i+}$  при переходе  $S$ -границы (1.74). В верхнем полупространстве, определив  $\zeta_{1-}$  и  $\zeta'_{1-}$ , мы получим уравнение  $(\lambda \zeta_{1-} = \zeta'_{1-})$  для  $\alpha$ , решение которого есть проблема определения корней  $\alpha_j, j=1, 2, \dots, N$  (все вещественные) многочлена степени  $N$ . Следовательно, общее решение мы должны представить в виде

$$Z(z) = \sum_{j=1}^N C_j \zeta_j(z) \exp(-\alpha_j t) \quad (1.77)$$

Коэффициенты  $C_j$  определяются при удовлетворении начального условия путем решения системы линейных уравнений:

$$\exp(-\lambda h_i) = \sum_{j=1}^N C_j \zeta_j(h_i), \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (1.78)$$

Численная реализация этого алгоритма может быть различной. В силу характера ТЕ-поля (только горизонтальные токи) возможно большими наборами  $S$ -пластин аппроксимировать любую горизонтально-слоистую среду в рамках индуктивной электроразведки (например, [39]).

### 1.3.5 Становление поля в присутствии идеального проводника

В геоэлектрической практике плохопроводящее основание, которое можно представить изолятором, вполне обычное явление и решение задачи становления по Тихонову имеет прямые практические приложения. С другой стороны, если ситуация

такова, что проводимость основания на два-три порядка превосходит среднюю проводимость исследуемой верхней части разреза, то имеет смысл другая идеализация модели - идеально-проводящее основание. В этом случае опять можно применить способ решения Тихонова. В краевой квазистационарной задаче (1.53) условие на нижней границе для изолятора ( $X' + \lambda X = 0$ ,  $\mu_i = \mu_0$ ) заменяется на  $X = 0$ . Нетрудно показать, что теперь при  $\lambda = 0$  уравнение для собственных значений не будет иметь нулевого решения. Это означает, что спад поля в самой поздней стадии будет происходить экспоненциально. Впервые эта ситуация этим же методом исследовалась в работе [24]. Нами реализована возможность расчета поля установления во многослойной среде с идеально-проводящим основанием в системе Подбор.

Рассмотрим решение для двухслойной ( $\rho$ ,  $h$ ) среды в этом случае. Вместо (1.62) получим

$$E_\varphi(r, z, t) = -2I\rho \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda a \left\{ \sum_{j=0}^\infty \frac{u_j^2 \exp(-\alpha_j t)}{\mu_0 S \alpha_j + \lambda} \right\} d\lambda, \quad (1.79)$$

где несколько изменился только знаменатель в подынтегральном выражении. Уравнение для  $\alpha_j$  также имеет бесконечное число решений для каждого значения  $\lambda$ :

$$\operatorname{tg}\left(h\sqrt{\mu_0 \alpha_j / \rho - \lambda^2}\right) = -\frac{\sqrt{\mu_0 \alpha_j / \rho - \lambda^2}}{\lambda},$$

но среди них нет такого, чтобы  $\alpha_j \rightarrow 0$  при  $\lambda \rightarrow 0$ , а это значит, что в пласте с идеально проводящим основанием поле спадает экспоненциально в поздней стадии.

### 1.3.6 Поздняя стадия ТЕ-процесса во многослойной среде

Рассмотрим позднюю стадию процесса установления в многослойной среде, пользуясь моделью и представлением решения по Тихонову, предложенным в предыдущей главе. Источник (токовая петля радиуса  $a$ ) и приемник поместим на дневной поверхности ( $z_l = z_1 = 0$ ,  $z = 0$ ) многослойной среды. Тогда, например, для  $E_\varphi$  имеем:

$$E_\varphi(r, z, t) = -I \cdot \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda a \left\{ \sum_{j=0}^\infty \frac{\exp(-\alpha_j(\lambda)t)}{M_j(\lambda)} \right\} d\lambda, \quad (1.80)$$

где подчеркнуто, что собственные числа  $\alpha_j$  являются функциями переменной интегрирования  $\lambda$ .

При  $t \rightarrow \infty$  интеграл будет определяться, в основном, при таких значениях  $\lambda$ , при которых  $\alpha_j$  стремятся к 0 - все, несколько или хотя бы одно. В противном случае спад поля в среде с изолирующим основанием в поздней стадии имел бы экспоненциальный характер. Рассмотрим собственные значения при  $\lambda \rightarrow 0$  и представим

$$\alpha_j = a_{j0} + a_{j1}\lambda + a_{j2}\lambda^2 + \dots,$$

тогда для  $a_{j0}$  получим уравнение (естественно, тригонометрическое) в рекуррентной записи:

$$\begin{aligned} \zeta_{j1} &= 1, \quad \zeta'_{j1} = 0, \\ \zeta_{ji+1} &= \zeta_{ji} \cos(\sqrt{\mu_0 \sigma_i a_{j0}} d_i) - \frac{\zeta'_{ji}}{u_{ji}} \sin(\sqrt{\mu_0 \sigma_i a_{j0}} d_i), \\ \zeta'_{ji+1} &= \zeta_{ji} u_{ji} \sin(\sqrt{\mu_0 \sigma_i a_{j0}} d_i) + \zeta'_{ji} \cos(\sqrt{\mu_0 \sigma_i a_{j0}} d_i), \\ \zeta'_{jN} &= 0. \end{aligned} \quad (1.81)$$

Нетрудно видеть одно решение  $\alpha_{00} = 0$ . Таким образом, при  $\lambda \rightarrow 0$  только  $\alpha_0 \rightarrow 0$  и достаточно в (1.80) в подынтегральном выражении сохранить только первый член ряда при  $t \rightarrow \infty$ .

Определим теперь  $\alpha_0$  при  $\lambda \rightarrow 0$ , считая  $\alpha_0$  величиной малой порядка  $\lambda$ . В таком случае получим следующее уравнение для  $\alpha_0$ :

$$\begin{aligned}\zeta_{01} &= 1, \quad \zeta'_{01} = -\lambda, \\ \zeta_{0i+1} &\approx \zeta_{0i}, \\ \zeta'_{0i+1} &\approx \zeta_{0i} \mu_0 \alpha_0 \sigma_i d_i + \zeta'_{ji}, \\ \zeta'_{0N} - \lambda \zeta_{0N} &= 0.\end{aligned}\tag{1.82}$$

Откуда и найдем, что

$$\alpha_0 \approx \frac{2\lambda}{\mu_0 \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i d_i}$$

при  $\lambda \rightarrow 0$ .

Далее,  $M_0 \approx \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i d_i$  и вместо (1.80) получим

$$E_\varphi(r, z, t) = -\frac{I}{S} \cdot \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda a \exp\left(\frac{-2\lambda t}{\mu_0 S}\right) d\lambda, \tag{1.83}$$

где  $S = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i d_i$  - суммарная продольная проводимость разреза. Полагая  $J_1(\lambda a) \approx \lambda a / 2$  (заменяя петлю диполем, что соответствует рассматриваемой сейчас поздней стадии), получаем простой табличный интеграл [4] и окончательно:

$$E_\varphi(r, t) = \frac{3M_z r}{\pi S} \cdot \frac{t}{\mu_0 S} \cdot \frac{1}{\left[ r^2 + \left( \frac{2t}{\mu_0 S} \right)^2 \right]^{5/2}}. \tag{1.84}$$

Правая часть очень известна в теории индуктивной электроразведки (например, [23]). Итак, в поздней стадии поле многослойного разреза с изолирующим основанием ведет себя, как поле проводящей плоскости с продольной проводимостью, равной суммарной продольной проводимости разреза. Это известнейший и характернейший факт из теории индуктивной импульсной электроразведки. Пожалуй, впервые был получен для многослойной среды в работе [37].

Это самое позднее асимптотическое представление. Сохраняя следующие члены в разложении решения краевой задачи (1.53) по степеням малости переменной  $\lambda$ , можно получить и более ранние асимптотики, как это делалось для простых сред в [25], [13].

## 1.4 Линеаризация

Выше анализировалась основная прямая задача индуктивных зондирований становлением. С точки зрения интерпретационного процесса эта, очень важная и определяющая, подлежащая постоянной оптимизации, но не единственная и не достаточная деталь аппарата инверсии. Применение прямой задачи в условиях процесса интерпретации должно дополняться возможностью анализа чувствительности сигнала к изменениям параметров разреза, возможностью анализа процесса распространения тока внутри среды. Кроме того, желательно иметь процедуры учета различных дополнительных к процессу электродинамического квазистационарного установления эффектов - вызванной поляризации, магнитной вязкости, влияния диэлектрической проницаемости, если это необходимо. И, наконец, следует признать, что интерпретация

данных, относящихся к горизонтально-неоднородным средам, с применением кажущихся параметров одномерных моделей (пусть даже многослойных) является исчерпавшим себя паллиативом. Современный интерпретационный процесс требует привлечения трехмерных математических моделей. Острота ситуации состоит и в том, что тенденцией электромагнитных исследований является организация сбора и обработки все больших объемов данных и, значит, все элементы аппарата инверсии, включая и элементы трехмерного характера, должны быть оперативны.

#### 1.4.1 Базовая модель и метод вторичных источников

Одномерная кусочно-однородная среда - до сих пор основная интерпретационная модель в геоэлектромангнитных исследованиях, в особенности, в методах установления с контролируемым источником. Магнитную проницаемость обычно можно всюду принять равной проницаемости вакуума. Хотя частотный подход позволяет формально записать решение с учетом диэлектрической проницаемости каждого слоя, численная реализация такого представления в режиме установления не освоена. Решение же во временной области (по Тихонову) предполагает квазистационарность уже на стадии постановки краевой задачи. Эта модель среды, описываемая лишь одномерной, кусочно-постоянной функцией  $\sigma_0(z)$ , является современным компромиссом между более сложно устроенной реальной средой и нашими программно-алгоритмическими и техническими возможностями для оперативных расчетов. Так или иначе, эта модель является базовой в интерпретационном процессе для зондирований становлением (ЗС). Достаточно часто обнаруживается, что базовая модель недостаточна, но любое усложнение этой модели наталкивается на трудности численной реализации. Мы, однако, призываем не спешить применять сугубо численные методы, в особенности, разностные. Ниже показано, как можно просто разрешить некоторые осложнения, оставаясь "вблизи" базовой модели и пользуясь почти теми же матсредствами, что и для самой базовой модели.

Базовая модель подразумевает квазистационарный, чисто электродинамический процесс и, в целом, можно говорить о базовой задаче, решение которой имеет известные интегральные представления для любого переменного и распределенного источника (например, [16]), где приведены решения прямой задачи ЗС частотным способом и по Тихонову). Если рассмотреть теперь возмущающий фактор, как дополнительный сторонний ток в базовой задаче, конкретно, в первом уравнении Максвелла, то можно получить алгоритм для расчетов аномального поля при возмущениях самого разного рода и трехмерного характера.

#### 1.4.2 Интегральное уравнение и борновское приближение

Используем простой, но достаточно важный пример осесимметричной задачи. Источник - токовая петля с током  $I$ , радиуса  $r_0$  и на уровне  $z_0$  - отключается. В таком случае, электрическое поле в цилиндрической системе координат имеет только компоненту  $E_\varphi$  и базовое решение можно записать в виде:

$$E_\varphi^0(r, z, r_0, z_0, t) = I \cdot E(r, z, r_0, z_0, t). \quad (1.85)$$

Допустим, что в некоторой кольцевой области с сечением  $S(r, z)$  действует некий возмущающий по отношению к базовой модели фактор, зависящий от электрического поля линейно. В этой области первое уравнение Максвелла после выключения источника будет выглядеть следующим образом:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma_0(z) \cdot \mathbf{E} + \mathbf{J}[\mathbf{E}], \quad (1.86)$$

где  $\hat{\mathcal{E}}$  - линейный оператор (в том числе, дифференциальный или интегральный). Поле, соответственно, можно представить, как сумму базового решения и аномальной части:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^0 + \mathbf{h}, \quad \mathbf{E} = \mathbf{E}^0 + \mathbf{e}. \quad (1.87)$$

Рассматривая член  $\hat{\mathcal{E}}[\mathbf{E}]$  в уравнении (1.86) как сторонний ток (невзаимодействующие между собой токовые петли с переменным током) в базовой среде ( $\sigma_0$ ), получим для полного поля

$$E_\varphi(r, z, r_0, z_0, t) = E_\varphi^0(r, z, r_0, z_0, t) + \iint_S \int_{-\infty}^t \hat{\mathcal{E}}[E_\varphi(\bar{r}, \bar{z}, r_0, z_0, \tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} E(r, z, \bar{r}, \bar{z}, t - \tau) d\tau d\bar{r} d\bar{z}. \quad (1.88)$$

Пока мы имеем интегральное уравнение, но нетрудно согласиться с тем, что при малых возмущениях можно заменить в подынтегральной функции полное поле нормальным ("базовым"). В таком случае, получим приближенное решение в виде:

$$E_\varphi(r, z, r_0, z_0, t) = E_\varphi^0(r, z, r_0, z_0, t) + I \cdot \iint_S \int_{-\infty}^t \hat{\mathcal{E}}[E(\bar{r}, \bar{z}, r_0, z_0, \tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} E(r, z, \bar{r}, \bar{z}, t - \tau) d\tau d\bar{r} d\bar{z}. \quad (1.89)$$

Можно было бы показать, что (1.89) есть линейная часть разложения решения интегрального уравнения (1.88) в ряд Неймана. Еще можно заметить, что наше приближение соответствует известному борновскому приближению в теории рассеяния. Именно в этом смысле употребляется здесь термин "линеаризация".

Формулы (1.88) и (1.89) весьма плодотворны. Принимая дополнительный сторонний ток в виде  $\hat{\mathcal{E}}[\mathbf{E}] = \Delta\sigma(r, z) \cdot \mathbf{E}$  или  $\hat{\mathcal{E}}[\mathbf{E}] = -\varepsilon \cdot \partial \mathbf{E} / \partial t$  или  $\hat{\mathcal{E}}[\mathbf{E}] = [\mathbf{K}_{\text{вп}} \cdot \mathbf{E} dt$ , можно построить алгоритмы для учета возмущений проводимости, для учета квазистационарного вклада токов смещения или учесть влияние вызванной поляризации во временной области. Такой подход можно называть методом вторичных источников. Ниже демонстрируются некоторые применения формул (1.88) и (1.89).

### 1.4.3 Интегральное представление производных по параметрам базовой модели

Как уже было сказано, горизонтально-слоистая модель разреза, определенная выше, как базовая модель и соответствующая прямая задача являются основными инструментами интерпретационного процесса в методе ЗС. При решении обратной задачи в той или иной форме анализируется чувствительность отклика к изменениям параметров модели (мощности и проводимости слоев). Другими словами, весьма желательно иметь в своем распоряжении производные от сигнала по параметрам. В силу сложности выражения для отклика чувствительность обычно определяется пробными просчетами основной прямой процедуры, что снижает оперативность решения обратной задачи. Предлагаем интегральное определение производных, позволяющее вычислять нужные производные, как дополнительный результат в процедуре прямой задачи, с небольшими дополнительными затратами машинного времени.

Рассмотрим устанавливающееся поле (компоненту  $E_\varphi$ ) токовой петли  $(r_0, z_0)$ . Представим функцию  $E$  в (1.85) в виде суперпозиции устанавливающихся пространственных гармоник:

$$E(r, z, r_0, z_0, t) = \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda r_0) r_0 Z(z, z_0, t, \lambda) d\lambda, \quad (1.90)$$

где функция  $Z$  определяется в результате решения соответствующей одномерной краевой задачи. Рассмотрим теперь возмущение  $\Delta\sigma$  в неограниченной по простиранию области  $0 \leq r \leq \infty$ ,  $z_1 \leq z \leq z_2$ . Воспользовавшись известным представлением

$$\int_0^{\infty} J_1(\bar{\lambda}r) J_1(\lambda r) r dr = \frac{\delta(\bar{\lambda} - \lambda)}{\lambda},$$

получим из (1.88):

$$\begin{aligned} \Delta E_{\varphi} = \Delta\sigma \cdot I \int_0^{\infty} J_1(\lambda r) \cdot J_1(\lambda r_0) \cdot \frac{r_0}{\lambda} \times \\ \times \left\{ \int_{z_1}^{z_2} \int_{-\infty}^t Z(\bar{z}, z_0, \tau, \lambda) \frac{\partial Z(z, \bar{z}, t - \tau, \lambda)}{\partial \tau} d\bar{z} d\tau \right\} d\lambda. \end{aligned} \quad (1.91)$$

Интегралы в фигурных скобках могут быть взяты с учетом конкретного способа разделения переменных в краевой задаче для функции  $Z$ . Формула (1.91) позволяет определять производную по проводимости (сопротивлению) слоя (малое возмущение  $\Delta\sigma$  по всему слою), а также и по мощности слоя (конечное возмущение  $\Delta\sigma$  в малой области  $\Delta z$  на границе слоя).

Подобные алгоритмы реализованы нами в комплексе Подбор.

#### 1.4.4 Быстрое приближенное моделирование задач установления различной размерности

Как уже говорилось, всякое отклонение от базовой модели (горизонтально-слоистой, квазистационарной, т.е. всюду  $\varepsilon = 0$ ) весьма осложняет прямую задачу и, в еще большей мере, обратную. Однако, латерально-неоднородная по проводимости среда - это такая существенная реалья, которую нельзя долго игнорировать, не рискуя потерять перспективу метода ЗС. Разумеется, имеется возможность численных расчетов 3-мерной прямой задачи разностными методами или методом интегральных уравнений. Однако, по нашему мнению, эти, безусловно интересные возможности, имеют слабое отношение к живому оперативному интерпретационному процессу по причине малодоступности широкому кругу геофизиков. Линеаризованный подход, предлагаемый формулой (1.89), конечно, достаточно оперативен, однако необходимо понять, насколько малы должны быть возмущения проводимости.

#### Линеаризованная одномерная задача

Построим процедуру быстрого приближенного расчета устанавливающегося поля в одномерной слоистой среде, т.е. для модели, которую мы определили, как базовую. Разумеется, актуальность такой процедуры решения прямой задачи невелика теперь потому, что вполне освоены точные алгоритмы для слоистой модели. Однако, учитывая скорость расчета и вид прямой задачи в линеаризованной постановке, нетрудно увидеть перспективу использования ее при решении обратной задачи. Кроме того, это продемонстрирует возможности линеаризованной постановки.

Итак, принимая в (1.86) дополнительный сторонний ток в виде  $\vec{E}[\mathbf{E}] = \Delta\sigma(r, z) \cdot \mathbf{E}$ , получим общее линеаризованное выражение для устанавливающегося поля кольцевого (двухмерного) возмущения проводимости на фоне базовой одномерной модели:

$$\begin{aligned} E_{\varphi}(r, z, r_0, z_0, t) = E_{\varphi}^0(r, z, r_0, z_0, t) + \\ + I \cdot \iint_S \int_{-\infty}^t E(\bar{r}, \bar{z}, r_0, z_0, \tau) \cdot \Delta\sigma(\bar{r}, \bar{z}) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} E(r, z, \bar{r}, \bar{z}, t - \tau) d\tau d\bar{r} d\bar{z}. \end{aligned} \quad (1.92)$$

Это некоторое приближение, в котором взаимодействие среды учитывается лишь в основном, в той мере, в которой нормальная референтная среда определяет электродинамический процесс в данной геоэлектрической ситуации. Взаимодействие же возмущений проводимости между собой не учитываются. Если необходимо учесть аномальный вклад еще одной кольцевой неоднородности, то просто добавляется еще один член в правой части, аналогичный представленному в (1.92). Впрочем, это все условно и область  $S$  в (1.92) может объединять и несколько фактически разделенных кольцевых возмущений.

Примем в качестве фоновой, нормальной среды однородное полупространство (проводимость -  $\sigma$ ), а слоистую структуру будем рассматривать, как кусочно-однородное возмущение проводимости  $\Delta\sigma_j$  в  $j$ -ой области  $z_j \geq z \geq z_{j+1}$ ,  $0 \leq r \leq \infty$  ( $j = 1, 2, \dots, K$ ), запишем выражение для полного поля в виде:

$$E_\varphi(r, z, r_0, z_0, t) = I \cdot E(r, z, r_0, z_0, t) + I \cdot \sum_{j=1}^K \Delta\sigma_j G_j(r, z, r_0, z_0, t), \quad (1.93)$$

где

$$G_j(r, z, r_0, z_0, t) = \int_0^\infty \int_{z_j}^{z_{j+1}} \int_{-\infty}^t E(\bar{r}, \bar{z}, r_0, z_0, \tau) \frac{\partial E(r, z, \bar{r}, \bar{z}, t - \tau)}{\partial \tau} d\bar{r} d\bar{z} d\tau. \quad (1.94)$$

$E$  для полупространства можно определить, как

$$E(r, z, r_0, z_0, t) = \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda r_0) r_0 Z(z, t, \lambda) d\lambda, \quad (1.95)$$

где

$$Z = \frac{\lambda^2}{\sigma} \exp(\lambda z) \left[ \frac{\exp(-u^2)}{\sqrt{\pi\tau}} - \operatorname{erfc}(u) \right], \quad (1.96)$$

$\tau = \frac{t\lambda^2}{\mu_0\sigma}$ ,  $u = \sqrt{\tau} + \frac{\lambda z}{2\sqrt{\tau}}$ , а функция  $\operatorname{erfc}$  определена как

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty \exp(-x^2) dx.$$

Коэффициенты  $G_j$ , соответственно, найдем в виде

$$G_j(r, z, r_0, z_0, t) = \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda r_0) \frac{r_0}{\lambda} Z_1(z, z_0, t, \lambda) d\lambda, \quad (1.97)$$

где

$$Z_1 = \left( \frac{\lambda}{\sigma} \right)^2 \exp(2\lambda z) \left\{ \operatorname{erfc}(u_1) - \frac{\exp(-u_1^2)}{2\sqrt{\pi\tau}} \right\} \Big|_{z_j}^{z_{j+1}}, \quad (1.98)$$

а  $u_1 = \sqrt{\tau} + \frac{\lambda z}{2\sqrt{\tau}}$ . На рис.1.2 представлено сравнение расчетов по этому приближенному алгоритму и по точному (система Подбор). Как видно, линеаризованное решение верно описывает характерные особенности процесса установления во многослойных средах различного типа, достаточно контрастных.



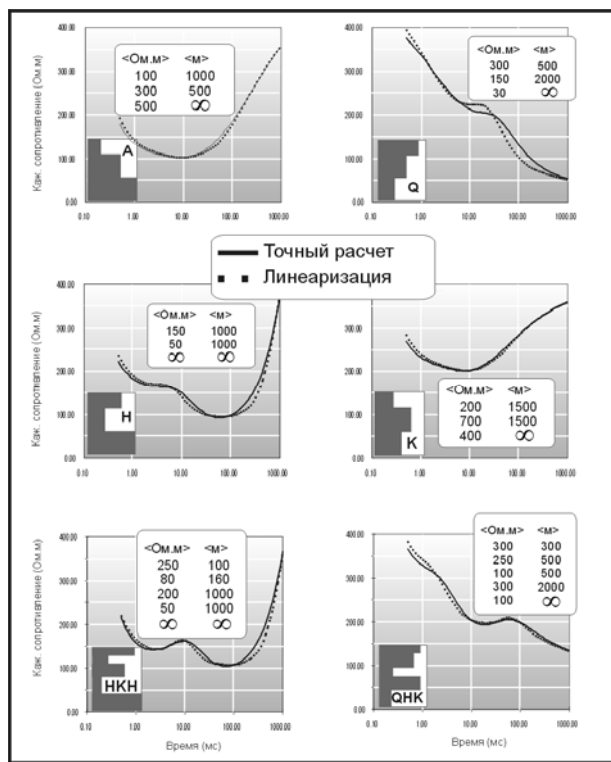


Рис. 1.2

### Линеаризованная квазитрехмерная задача

Заметим, что линейное приближение, использованное в (1.89), означает, что в этом приближении влияние кольцевого возмущения проводимости есть простая сумма вкладов отдельных его частей. Таким образом, можно рассмотреть вклад локальной неоднородности. Опишем базовую модель, как  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N-1}, \sigma_N = 0$  с границами  $z_1 = 0 > z_2 > \dots > z_N$ , магнитооднородную. На дневной поверхности в петле радиуса  $a$  выключается ток  $I$ . Нормальный процесс установления опишем по Тихонову:

$$E_\varphi(r, z, t) = I \cdot E = -I \cdot \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) \lambda a \left\{ \sum_{j=0}^\infty \frac{\zeta_j(z)}{M_j} \exp(-\alpha_j t) \right\} d\lambda, \quad (1.99)$$

где функции  $\zeta_j$  (и  $\zeta'_j$ ) последовательно определяются сверху вниз через свои же непрерывные значения на границах в каждом  $i$ -ом слое ( $z_i \geq z \geq z_{i+1}$ )

$$\zeta_j(z) = \zeta_{ji} \cdot \text{ch}[u_{ji}(z - z_i)] + \frac{\zeta'_{ji}}{u_{ji}} \cdot \text{sh}[u_{ji}(z - z_i)],$$

причем  $\zeta_{j1} = \zeta_j(0) = 1$ ,  $\zeta'_{j1} = \zeta'_j(0) = -\lambda$ , для  $\alpha_j$  имеем уравнение на нижней границе при  $z = z_N$   $\zeta'_z - \lambda \zeta = 0$ ,

$$M_j = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\sigma_i}{2u_{ji}^2} \left\{ (z_{i+1} - z_i) \cdot [\zeta_{ji}^2 u_{ji}^2 - (\zeta'_{ji})^2] + (\zeta_{ji+1} \zeta'_{ji+1} - \zeta_{ji} \zeta'_{ji}) \right\},$$

$$\text{и } u_{ji} = \sqrt{\lambda^2 - \alpha_j \mu_0 \sigma_i}.$$

Рассмотрим теперь в  $i$ -ом слое, по всей его мощности, однородное возмущение проводимости  $\Delta\sigma$ , в плане являющееся частью кольца, т.е. в области  $z_i \geq z \geq z_{i+1}$ ,  $r_1 \leq r \leq r_2$ ,  $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$ . Производя интегрирования в (1.89) с учетом (1.99), получим для аномального сигнала в соосной приемной петле радиуса  $b$ :

$$\Delta \text{ЭДС} = \Delta\sigma(\varphi_2 - \varphi_1) I \int_0^\infty R J_1(\lambda a) J_1(\bar{\lambda} b) \lambda a \bar{\lambda} b \left\{ \sum_{j=0}^\infty \sum_{\bar{j}=0}^\infty \frac{Z_{j\bar{j}} T_{j\bar{j}}}{M_j \bar{M}_{\bar{j}}} \right\} d\lambda d\bar{\lambda}, \quad (1.100)$$

где

$$R = \frac{\bar{\lambda} r J_0(\bar{\lambda} r) J_1(\lambda r) - \lambda r J_0(\lambda r) J_1(\bar{\lambda} r)}{\lambda^2 - \bar{\lambda}^2} \Big|_{r_1}^{r_2},$$

$$Z_{\bar{j}\bar{j}} = \frac{1}{\bar{u}_{\bar{j}\bar{j}}^2 - u_{j\bar{j}}^2} [(\bar{\zeta}_{\bar{j}i+1} \zeta'_{ji+1} + \bar{\zeta}_{\bar{j}\bar{j}} \zeta'_{ji}) - (\zeta'_{\bar{j}i+1} \zeta_{ji+1} + \zeta'_{\bar{j}\bar{j}} \zeta_{ji})],$$

$$T_{\bar{j}\bar{j}} = \frac{-\alpha_j}{\bar{\alpha}_{\bar{j}} - \alpha_j} [\exp(-\bar{\alpha}_{\bar{j}} t) - \exp(-\alpha_j t)].$$

Этот алгоритм реализован в программе FAST3D комплекса Подбор. Четырехкратное суммирование, предлагаемое формулой (1.100), может быть быстрым из-за симметрии по переменным  $(\lambda, \bar{\lambda})$  и по индексам  $(j, \bar{j})$ . Нет больших ограничений в связи с формой неоднородности (сектор кольца) - более сложные формы можно создавать наборами таких секторов (это предусмотрено). Алгоритм позволяет практически мгновенно производить расчет аномального объекта в режиме установления.

#### 1.4.5 Отклик, как поле мгновенного распределения токов в среде

Рассматривая отклик  $N$ -слойной среды в каждый момент, как суммарное поле мгновенного (квазистационарное приближение!) распределения токов в среде, можно получить полезное представление сигнала установления на дневной поверхности, как сумму вкладов от отдельных частей среды. Разумеется, в этом случае можно воспользоваться законом Био-Савара, но здесь снова применим метод вторичного источника.

Рассмотрим член  $\sigma_0(z) \cdot \mathbf{E}$  в первом уравнении Максвелла в базовой задаче в качестве стороннего тока. Таким образом, среды нет, а есть только распределенный и меняющийся источник при отсутствии переходного процесса. Отклик  $(E_\varphi^0)$  при выключении тока в петле в этом случае можно описать, как

$$E_\varphi(r, z, t) = I \cdot E = \frac{I \mu_0}{2} \cdot \delta(t) \cdot \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) a \exp(-\lambda |z|) d\lambda \quad (1.101)$$

Формально применяя выражение (1.88), интегрируя и пользуясь определением и свойствами символической функции Дирака, используя решение базовой задачи в виде (1.99), получим для времен  $t > 0$ :

$$E_\varphi = \sum_{i=1}^{N-1} E_\varphi^{(i)},$$

$$E_\varphi^{(i)} = -\frac{I}{2} \cdot \int_0^\infty J_1(\lambda r) J_1(\lambda a) a \left[ \sum_{j=0}^\infty \frac{P_{ji}}{M_j} \exp(-\alpha_j t) \right] d\lambda, \quad (1.102)$$

$$P_{ji} = (\lambda \zeta_{ji+1} - \zeta'_{ji+1}) \cdot \exp(\lambda z_{i+1}) - (\lambda \zeta_{ji} - \zeta'_{ji}) \cdot \exp(\lambda z_i),$$

где  $M_j$ ,  $\zeta_j$  и  $\alpha_j$  определены выше.

Нетрудно видеть, учитывая свойства функций  $\zeta_j$ , что  $\sum_i P_{ji} = 2\lambda$  и решение, предлагаемое формулой (1.102), фактически совпадает с прямым решением (1.99).

Такое представление решения прямой задачи может быть полезно при построении процедуры инверсии, а также при анализе эффективности применения различных форм возбуждающего импульса тока (программа СЛОЙ комплекса Подбор).

### 1.5 Решение Тихонова задачи о становлении электромагнитного поля

Выше предлагались решения задачи становления двумя способами. Во многих деталях, еще больше в их сочетании, эти решения нестандартны. Напомним, что источник

учитывался как граничное условие, уменьшено число определяемых функций без введения потенциалов, начато решение задачи с перехода к нестационарной задаче в области пространственных гармоник (классический подход предусматривает введение векторов-потенциалов для точечных источников и переход в частотный режим). Далее, в области пространственных гармоник решается одномерная нестационарная задача двумя способами разделения переменных, и получены, соответственно, интеграл Фурье и (в квазистационарном приближении и при бесконечном или нулевом сопротивлении основания) ряд Фурье. Но, отвлекаясь от деталей и порядка применения преобразований, нужно признать, что полученные решения, более удобные, компактные и общие, все же соответствуют двум традиционным способам решения, известным, как "решение в частотной области" и "решение во временной области". Как известно, эти два основных подхода к решению задачи об установлении поля в слоистой среде были предложены почти одновременно А.Н. Тихоновым [35] и М.С. Шейнманом [38].

### 1.5.1 О способах решения задачи становления

Решение по Шейнману приводит к двукратному интегралу Фурье-Ганкеля. Алгоритм, использованный Шейнманом, получил наибольшее распространение и развитие в России и за рубежом (например, [3], [6], [36]), несмотря на трудности в численной реализации, связанные с осциллирующими факторами в преобразованиях Фурье и Ганкеля. Разумеется, это понятно и естественно - подход имеет давнюю традицию в физике и математике и в качестве промежуточного этапа включает в себя расчет привычного частотного режима, который является сам по себе рабочим режимом некоторых электромагнитных методов. Так что трудности численной реализации так или иначе были преодолены, но только в квазистационарном приближении. Наиболее значительными численными реализациями этого подхода явились в России программа Л.А. Табаровского и В.П. Соколова [28], в которой использовалась при интегрировании сплайн-интерполяция, и программы У.Л. Андерсона за рубежом, в которых он применил свой метод цифровой фильтрации [40], [43], [44], [45]. Однако решение задачи установления в виде двойного интеграла Фурье-Ганкеля имеет еще тот недостаток, что оно с большим трудом поддается асимптотическим разложениям. На его основе весьма сложно провести анализ особенностей установления поля различных источников, особенно, в средах с изолирующим основанием.

Метод Тихонова некоторое время развивался в работах О.А. Скугаревской, П.П. Фролова и других авторов (например, [25], [7]), однако это не привело к появлению эффективной вычислительной процедуры для многослойных сред. За рубежом это решение почти не известно (можем указать лишь [50]), и мало применялось в России. Нужно заметить, что решение Тихонова, которое мы здесь обсуждаем, вовсе не единственное представление решения задачи установления во временной области. Сам же А.Н.Тихонов дал и другое решение методом многократных отражений, удобное в ранней стадии [34]. Общий подход к решению во временной области состоит в переходе к одномерной нестационарной или квазистационарной задаче в области пространственных гармоник. Поэтому такой подход иногда называют методом устанавливающихся пространственных гармоник. Эту одномерную задачу можно решать различными способами. В работе [46] эта задача решается конечно-разностным способом. Авторы работы [40] разделили переменные ( $t$  и  $z$ ) в краевой задаче и свели ее к задаче Штурма-Лиувилля, которую также предложили решать численно. Собственно, подход Тихонова состоит в последовательном аналитическом решении также и задачи Штурма-Лиувилля, получении и анализе уравнения для собственных значений, представлении решения в виде ряда по собственным функциям и аналитическом выражении коэффициентов такого представления на основании начального условия.

Возможен также подход к решению во временной области, основанный на аппроксимации геоэлектрической модели. Для магнитной моды, возбуждаемой токовой петлей, расположенной на дневной поверхности, можно с достаточной точностью описать непрерывную по вертикали горизонтально-слоистую геоэлектрическую среду дискретным набором проводящих плоскостей. Решение в этом случае обладает некоторой благоприятной для численных расчетов спецификой ([30], [39]).

Возвращаясь к оригинальной работе А.Н.Тихонова (в соавторстве с О.А. Скугаревской) [35], нужно заметить, что там был дан весьма частный случай двухслойной среды, который не так-то просто может быть обобщен. Однако нам удалось успешно использовать этот способ решения, как чрезвычайно эффективное средство для получения асимптотических выражений для поздних стадий установления полей различных источников ([4], [20], [13]). Мы также успешно численно реализовали и многослойный алгоритм для расчетов процессов установления электрического и магнитного типов при возбуждении различными источниками ([14], [16], [18]). Так или иначе, подход Тихонова, над развитием которого мы много работали, нуждается в современном изложении.

### 1.5.2 Магнитная мода в многослойной среде

Приведем подробное решение задачи становления способом, предложенным А.Н. Тихоновым в работе [35] на примере становления поля магнитного типа в многослойной среде, используя токовую петлю в качестве источника. Рассмотрим пока произвольную горизонтально-слоистую модель ( $\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_{N-1}, \sigma_N$  - проводимости,  $\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}, \mu_N$  - магнитные проницаемости,  $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N-1}, \varepsilon_N$  - диэлектрические проницаемости,  $z_1 = 0 < z_2 < \dots < z_{N-1} < z_N$  - координаты границ). На границе с номером  $l$  ( $z = z_l$ ) поместим горизонтальную токовую петлю радиуса  $a$ , ток в которой изменяется по закону  $I \cdot q(t)$ .

Нетрудно видеть, учитывая (1.23-1.28), что в цилиндрической системе координат отличны от 0 компоненты  $H_r$ ,  $H_z$  и  $E_\varphi$ , которые можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} H_r(r, z, t) &= -\frac{I}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda r) a J_1(\lambda a) \frac{\partial X(z, t, \lambda)}{\partial z} d\lambda, \\ H_z(r, z, t) &= \frac{I}{2} \int_0^\infty J_0(\lambda r) a J_1(\lambda a) \lambda X(z, t, \lambda) d\lambda, \\ E_\varphi(r, z, t) &= \frac{I \mu(z)}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda r) a J_1(\lambda a) \frac{\partial X(z, t, \lambda)}{\partial t} d\lambda. \end{aligned} \quad (1.103)$$

В общем случае для функции  $X$  имеем краевую задачу

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} - \lambda^2 \cdot X &= \mu \sigma \frac{\partial X}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 X}{\partial t^2}, \quad z_i < z < z_{i+1}, \quad i = 1, \dots, N-1, \\ [\mu X] &= 0, \quad [X'_z] = 2\lambda q(t) \cdot \Delta(i-l), \\ X &\rightarrow 0, \quad |z| \rightarrow \infty, \end{aligned} \quad (1.104)$$

где  $i = 1, \dots, N$ , а  $\Delta(i-l) = 1$ , если  $i = l$ , и  $\Delta(i-l) = 0$ , если  $i \neq l$ .

Эту задачу, как мы выяснили уже выше, можно решить, разделяя переменные и отделяя переменную  $t$  в виде  $\exp(-i\omega t)$ , где независимая переменная  $\omega$  принимает непрерывный спектр значений  $-\infty \leq \omega \leq \infty$ , что и приводит нас к традиционному решению задачи установления, известному, как "решение в частотной области".

Но сейчас нас интересует решение, которое предложил А.Н.Тихонов. Чтобы отвлечься от деталей, считаем среду немагнитной (всюду  $\mu = \mu_0$  - магнитной проницаемости вакуума). Первый шаг состоит в ограничении задачи по  $z$  областью  $0 \leq z \leq z_N$ . Для этого примем квазистационарное приближение (всюду  $\varepsilon = 0$ ) и положим сопротивления верхнего и нижнего полупространств равными бесконечности ( $\sigma_0 = \infty$ ,  $\sigma_N = \infty$ ). В этих областях правая часть в уравнении для функции  $X$  обращается в 0, и в верхнем полупространстве решение есть  $X(z, t) = X(0, t) \exp(\lambda z)$ , в нижнем, соответственно,  $X(z, t) = X(z_N, t) \exp[-\lambda(z - z_N)]$ . Приближаясь к границам, в пределе на самих границах получим, что

$$X'_z(0, t) - \lambda X(0, t) = 0, \quad X'_z(z_N, t) + \lambda X(z_N, t) = 0.$$

Но это условия на внешних сторонах границ области  $0 \leq z \leq z_N$ . Учитывая условия на границах для функции  $X$  в (1.104), получим условия на внутренних сторонах границ области:

$$X'_z(0, t) - \lambda X(0, t) = 2\lambda q(t) \cdot \Delta(1-l), \quad (1.105)$$

$$X'_z(z_N, t) + \lambda X(z_N, t) = 2\lambda q(t) \cdot \Delta(N-l). \quad (1.106)$$

Далее, упростим задачу, рассмотрев режим источника, как выключение постоянного тока в момент  $t = 0$  (т.е.,  $q(t) = 1 - U(t)$ , где  $U(t)$  - функция Хевисайда), что позволяет отдельно рассмотреть стационарную задачу и использовать ее решение, как начальное условие для квазистационарной. Итак, в ограниченной области  $0 \leq z \leq z_N$  имеем стационарную задачу с источником:

$$\begin{aligned} \overline{X}_{zz} - \lambda^2 \cdot \overline{X} &= 0, \quad z_i < z < z_{i+1}, \\ \overline{X}'_z - \lambda \overline{X} &= 2\lambda \Delta(1-l), \quad z = z_1 = 0, \\ [\overline{X}] &= 0, \quad [\overline{X}'_z] = 2\lambda \Delta(i-l), \quad z = z_i, \\ \overline{X}'_z + \lambda \overline{X} &= 2\lambda \Delta(N-l), \quad z = z_N, \end{aligned} \quad (1.107)$$

и квазистационарную во временной области  $t \geq 0$  уже без источника:

$$\begin{aligned} X''_{zz} - \lambda^2 \cdot X &= \mu_0 \sigma \frac{\partial X}{\partial t}, \quad z_i < z < z_{i+1}, \\ X'_z - \lambda X &= 0, \quad z = 0, \\ [X] &= 0, \quad [X'_z] = 0, \quad z = z_i, \\ X'_z + \lambda X &= 0, \quad z = z_N, \\ X &= \overline{X}(\lambda, z), \quad t = 0, \\ X &= 0, \quad t = \infty, \end{aligned} \quad (1.108)$$

где  $i = 1, \dots, N-1$ .

### 1.5.3 Редукция к задаче Штурма-Лиувилля и ее решение

Разделяем переменные в краевой задаче (1.108) вполне очевидным образом, как  $\zeta(z) \cdot \exp(-\alpha t)$ , требуя  $\alpha > 0$ . Тогда для функции  $\zeta(z)$  получаем краевую задачу третьего рода типа Штурма:

$$\begin{aligned}
&\zeta_{zz}'' - (\lambda^2 - \mu_0 \sigma_i \alpha) \cdot \zeta = 0, \quad z_i < z < z_{i+1}, \\
&\zeta_z' - \lambda \zeta = 0, \quad z = 0, \\
&[\zeta] = 0, \quad [\zeta_z'] = 0, \quad z = z_i, \\
&\zeta_z' + \lambda \zeta = 0, \quad z = z_N,
\end{aligned} \tag{1.109}$$

где произведение  $\mu_0 \sigma$  есть кусочно-постоянная функция  $z$ . Проблему решения (1.109) можно охарактеризовать, как самосопряженную задачу о собственных значениях, для которой имеет место осцилляционная теорема Штурма, гласящая: существует бесконечное множество собственных значений, все собственные значения действительны и могут быть расположены в виде неограниченно возрастающей монотонной последовательности ( $\alpha_0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_j < \dots$ ). Каждое собственное значение имеет кратность 1; таким образом все собственные функции  $\zeta_j(z)$ , соответствующие одному и тому же собственному значению  $\alpha_j$ , отличаются друг от друга лишь на постоянный, отличный от нуля множитель. Каждая собственная функция  $\zeta_j(z)$  имеет в открытом интервале  $(z_1, z_N)$  ровно  $j$  нулей. Собственные функции удовлетворяют соотношению ортогональности

$$\int_{z_1}^{z_N} \mu_0 \sigma(z) \zeta_k(z) \zeta_j(z) dz = 0, \quad \text{где } k \neq j.$$

Авторы работы [40] предпочли конечно-разностное решение проблемы (1.109), здесь же предлагается продолжить аналитическое развитие решения. Итак, в  $i$ -ом слое имеем общее решение уравнения в (1.109) в виде  $\zeta(z) = A_i \exp(u_i z) + B_i \exp(-u_i z)$ , где  $u_i = \sqrt{\lambda^2 - \mu_0 \sigma_i \alpha}$ . Можно представить это в другом виде, выразив коэффициенты  $A_i, B_i$  через значения функции и ее производной на  $i$ -ой границе:

$$\zeta(z) = \zeta_i \cdot \text{ch}[u_i(z - z_i)] + \frac{\zeta_i'}{u_i} \cdot \text{sh}[u_i(z - z_i)]. \tag{1.110}$$

Такое представление дает ключ к решению задачи (1.109). В самом деле, положив на верхней границе  $\zeta_1 = 1$  и, следовательно,  $\zeta_1' = \lambda$ , используя формулу (1.110), как рекуррентную формулу пересчета (при  $z = z_{i+1}$ ) вниз с границы на границу, получаем, посредством условия на нижней границе, уравнение для собственных значений  $\alpha_j$ . В процессе решения этого уравнения определяются все  $\zeta_i, \zeta_i', i = 2, \dots, N$  для каждого собственного значения  $\alpha_j$  и, в соответствии с (1.110), определяется полностью каждая собственная функция  $\zeta_j(z)$  в области  $z_1 = 0 \leq z \leq z_N$ . Здесь и ниже мы используем индекс  $j$  для нумерации собственных чисел и собственных функций, а индекс  $i$  - для нумерации слоев в разрезе. Таким образом,  $\zeta_{ji}$  есть значение  $j$ -ой собственной функции на  $i$ -ой границе. Также,  $u_{ji} = \sqrt{\lambda^2 - \mu_0 \sigma_i \alpha_j}$ .

Теперь можно представить общее решение квазистационарной задачи (1.108) в виде суперпозиции:

$$X(z, t) = \sum_{j=0}^{\infty} C_j \cdot \zeta_j(z) \cdot \exp(-\alpha_j t), \tag{1.111}$$

где коэффициенты  $C_j$  найдем, удовлетворяя начальному условию:

$$\bar{X}(z) = \sum_{j=0}^{\infty} C_j \cdot \zeta_j(z). \tag{1.112}$$

Для нахождения  $C_j$  умножим (1.112) на  $\mu_0 \sigma \zeta_k(z)$  ( $k = 0, 1, \dots$ ) и проинтегрируем по  $z$  от 0 до  $z_N$ . Дифференцированием можно убедиться, что имеют место первообразные:

$$\begin{aligned}\int \mu_0 \sigma \zeta_j \zeta_k dz &= \frac{1}{\alpha_k - \alpha_j} (\zeta_j' \zeta_k - \zeta_j \zeta_k'), \\ \int \mu_0 \sigma \zeta_j^2 dz &= \frac{\mu_0 \sigma}{2u_j^2} \{z \cdot [u_j^2 \zeta_j^2 + (\zeta_j')^2] - \zeta_j' \zeta_j\}, \\ \int \mu_0 \sigma \bar{X} \zeta_k dz &= \frac{1}{\alpha_k} (\bar{X}' \zeta_k - \bar{X} \zeta_k').\end{aligned}\quad (1.113)$$

Подставляя пределы в каждом однородном слое и суммируя, пользуясь условиями краевых задач для функций  $\bar{X}$  и  $\zeta_j$ , убеждаемся, что соотношение ортогональности справедливо и в нашем случае кусочно-постоянной функции  $\sigma(z)$ , и для  $C_j$  получаем:

$$C_j = \frac{\int_0^{z_N} \mu_0 \sigma \bar{X} \zeta_j dz}{\int_0^{z_N} \mu_0 \sigma \zeta_j^2 dz} = \frac{2 \lambda \zeta_{jl}}{\mu_0 \alpha_j M_j}, \quad (1.114)$$

где

$$M_j = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\sigma_i}{2 u_{ji}^2} \{d_i [\zeta_{ji}^2 u_{ji}^2 - (\zeta_{ji}')^2] + (\zeta_{ji+1} \zeta_{ji+1}' - \zeta_{ji} \zeta_{ji}')\},$$

$d_i = z_{i+1} - z_i$  - мощности слоев, а для  $\zeta_{ji}$  и  $\zeta_{ji}'$  имеем в соответствии с общим выражением (1.10) рекуррентные формулы

$$\begin{aligned}\zeta_{ji+1} &= \zeta_{ji} \operatorname{ch}(u_{ji} d_i) + \frac{\zeta_{ji}'}{u_{ji}} \operatorname{sh}(u_{ji} d_i), \\ \zeta_{ji+1}' &= \zeta_{ji} u_{ji} \operatorname{sh}(u_{ji} d_i) + \zeta_{ji}' \operatorname{ch}(u_{ji} d_i).\end{aligned}\quad (1.115)$$

Следует обратить внимание на то, что  $u_{ji}$  могут принимать мнимые значения и тогда вещественное гиперболическое решение переходит в вещественное тригонометрическое решение, т.е.

$$\begin{aligned}\zeta_{ji+1} &= \zeta_{ji} \cos(u_{ji} d_i) + \frac{\zeta_{ji}'}{u_{ji}} \sin(u_{ji} d_i), \\ \zeta_{ji+1}' &= -\zeta_{ji} u_{ji} \sin(u_{ji} d_i) + \zeta_{ji}' \cos(u_{ji} d_i).\end{aligned}\quad (1.116)$$

где теперь  $u_{ji} = \sqrt{\mu_0 \sigma_i \alpha_j - \lambda^2}$ .

Таким образом, задача решена. Подчеркнем, что описанный алгоритм вполне успешно используется уже десятилетие для расчетов кривых становления в системе Подбор в реальном диапазоне времен для сред с любым основанием, хотя, как увидим, он наиболее удобен для расчетов поздней стадии процесса. Использование этого алгоритма поясняется ниже на некоторых примерах в главе 2. При численной реализации основные трудности связаны с решением трансцендентного уравнения для собственных значений. Однако, эта проблема (проблема начального приближения) решается в связи с необходимостью решать уравнение для каждого узла интегрирования в интегралах (1.103).

## 2 Система Подбор

Распространение персональных компьютеров в 80-х годах в геофизической среде потребовало создания соответствующего математического обеспечения для электромагнитных методов, в частности, для методов переходных процессов.

К наиболее значительным и выдержавшим испытание временем относятся системы ЭРА и Подбор в России и TEMIX на Западе. Это объясняется большими усилиями разработчиков по созданию развитого пользовательского графического интерфейса и удачным решением проблемы быстрого действия процедуры решения основной (многослойной) прямой задачи, что имело в те годы большое значение. Причем, в каждом случае проблема была решена различным образом.

В TEMIX были использованы алгоритмы У.Андерсона [42], [43], [44], [45], в которых решение задачи установления в виде двойной трансформации Фурье-Ганкеля имело быструю реализацию за счет его техники цифровой фильтрации. В системе ЭРА использовалась аппроксимация геоэлектрического разреза набором проводящих плоскостей, что давало быструю вычислительную реализацию [39]. Наконец, в системе Подбор использовалось решение во временной области А.Н.Тихонова [35], действительная арифметика которого существенно способствовала быстродействию программы. Недостатки каждого из подходов в дальнейшем компенсировались за счет растущих ресурсов персональных компьютеров. В системе ЭРА в некоторых случаях стал использоваться более мощный частотный подход, унаследованный из программы АЛЕКС [28]. В системе Подбор также был привлечен частотный подход и реализован глубокий синтез решения во временной области и решения в частотной области.

Нужно отметить, что, кроме упомянутых, в мире (например, Австралия), а также и в России (Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Иркутск) впоследствии появились и другие программные продукты для метода переходных процессов.

В этой главе мы дадим систематическое описание программного комплекса Подбор, в котором с одной стороны реализован математический аппарат, приведенный в главе 1, а с другой обеспечены весьма развитым сервисом методические принципы зондирования становлением в ближней зоне (ЗСБ). Тут следует подчеркнуть, что система Подбор создавалась и развивалась в целях обеспечения прежде всего структурной электроразведки. Применение его в каких-то нестандартных малоглубинных модификациях метода переходных процессов требует особой квалификации пользователей-геоэлектриков.

Система Подбор была создана в наиболее простом варианте на рубеже 80-90-ых годов и с тех пор существовала, развивалась и широко применялась в виде ряда версий, сменив среду разработки и используемую операционную систему (Борланд Паскаль и DOS на Дельфи и Windows).

### 2.1 Алгоритмические особенности системы Подбор

Главными особенностями созданного нами оперативного матобеспечения для зондирования становлением в ближней зоне являются:

- 1) синтез "решений в частотной области" и "решений во временной области";
- 2) интегральный способ расчета производных сигнала по параметрам разреза по тому же алгоритму и параллельно расчету самого сигнала. Крайне полезное обстоятельство для процедур решения обратных задач;



- 3) последовательное расширение прямых и обратных задач зондирования становлением (ЗС) для обслуживания импульсных зондирований со сложной формой питающего импульса.

Следует пояснить, как, собственно, реализовывался упомянутый синтез двух решений, полученных двумя способами. Напомним, что выражение для сигнала становления можно представить в следующем виде:

$$e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t) Q(\omega) \left\{ \int_0^{\infty} F(\lambda, \omega) d\lambda \right\} d\omega, \quad (2.1)$$

или, изменив порядок интегрирования,

$$e(t) = \int_0^{\infty} T(\lambda, t) d\lambda, \quad (2.2)$$

где

$$T(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t) Q(\omega) F(\lambda, \omega) d\omega. \quad (2.3)$$

Мы сейчас представляли решение задачи становления в рамках подхода, известного, как "решение в частотной области". При некоторых ограничениях, а именно, изолирующие или идеальнопроводящие верхнее и нижнее полупространства, в квазистационарном приближении, можно представить

$$T(\lambda, t) = \sum_{j=0}^{\infty} C_j \exp[-\alpha_j(\lambda)t] X_j(\lambda), \quad (2.4)$$

и это будет уже решение "по Тихонову" или "решение во временной области". Иначе говоря, мы рассматриваем решения в виде интеграла и ряда Фурье, которые мы подробно обсуждали в главе 1. Это, конечно, все условно и речь идет просто о разных вариантах разделения переменных. Однако при численной реализации (2.3) и (2.4) мы сталкиваемся с весьма различными проблемами. При интегрировании (2.3) трудности подстерегают на больших временах, кроме того, интегрирование затрудняется, если источник и приемник располагаются на одном уровне (например, на дневной поверхности). Обычно интегрируют не функцию  $F$ , а разность:

$$\Delta T(\lambda, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t) Q(\omega) [F(\lambda, \omega) - F_0(\lambda, \omega)] d\omega, \quad (2.5)$$

где  $F_0$  - функция, соответствующая однородному полупространству. Во временной области полное поле восстанавливается с использованием известных формул. Такой прием не всегда хорош, например, если прилегающий к установке слой тонок или обладает высоким сопротивлением. Напротив, представление в виде ряда (2.4) легче рассчитывается в поздней стадии, нет проблем при помещении источника и приемника на один уровень.

Мы используем оба эти представления следующим образом. Разумеется, если основание разреза изолирующее, то используется решение "по Тихонову". Если основание проводящее и есть необходимость применять решение в виде интеграла Фурье, то интегрируется разность (2.5), но в качестве функции  $F_0$  используется почти та же "слоистая" функция  $F$ , только с непроводящим основанием. Во временной области полное поле восстанавливается с помощью решения в виде ряда Фурье. Понятно, что интегрирование (2.5) радикально упрощается из-за резкого сужения необходимого частотного диапазона.

Для быстрого расчета мы также анализируем глубинность для заданного диапазон времен, для которого нужно рассчитать процесс становления, и "обрезаем" снизу

"лишнюю" среду. При этом опять-таки возникает возможность использования решения в виде ряда.

В предварительном порядке приведем сейчас два замечательных примера работы программ системы Подбор. На рис. 2.1 приведено черно-белое изображение графического пользовательского интерфейса системы Подбор. Рассчитана и представлена кривая для весьма простой одномерной трехслойной среды. Наблюдаемый в окрестности времени 1 мс резкий импульсный всплеск (шириной всего около 0.4 мс) очень необычен и, кажется, примеры такого рода ранее не обсуждались.

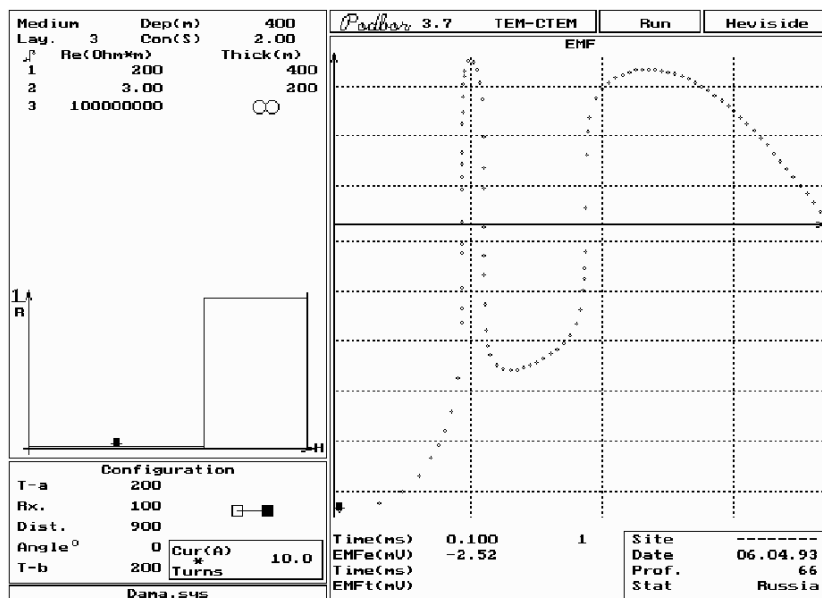


Рис.2.1. Расчет кривой разнесенных зондирований

Дело в том, что принято считать, что кривая разнесенных зондирований для такой установки ("петля-петля") должна иметь один переход через ноль. При обычном шаге по времени можно просто не обнаружить такое поведение кривой. Вначале ситуация оценивалась, как дефект работы программы. Анализируя "ошибку", авторы использовали для тестирования программу АЛЕКС и получили тот же результат. Постепенно сформировался приведенный пример, как реальный теоретический факт (1994г.). В дальнейшем А.К.Захаркин получил весьма близкую кривую физическим моделированием, аппроксимировав среду набором металлических пластин. Таким образом, именно использование программы Подбор позволило установить новый и важный факт, имеющий большое методическое значение для ЗСБ.

На рис.2.2 представлен пример расчетов (произведенных в Подборе) для соосной приемно-питающей установки ЗСБ кривых становления (в виде принятых в ЗСБ кривых кажущегося сопротивления). Этот пример интересен сравнением процессов при сверхпроводящем и изолирующем основании. Спад поля под влиянием идеально проводящего основания происходит экспоненциально, что отражается *резким ростом* значений кажущегося сопротивления. При конечном малом сопротивлении также имеется подобная тенденция. Если она не преодолена (т.е., недостаточен диапазон регистрации), то вид кривой может привести к совершенно неверным предварительным заключениям о нижней части разреза.

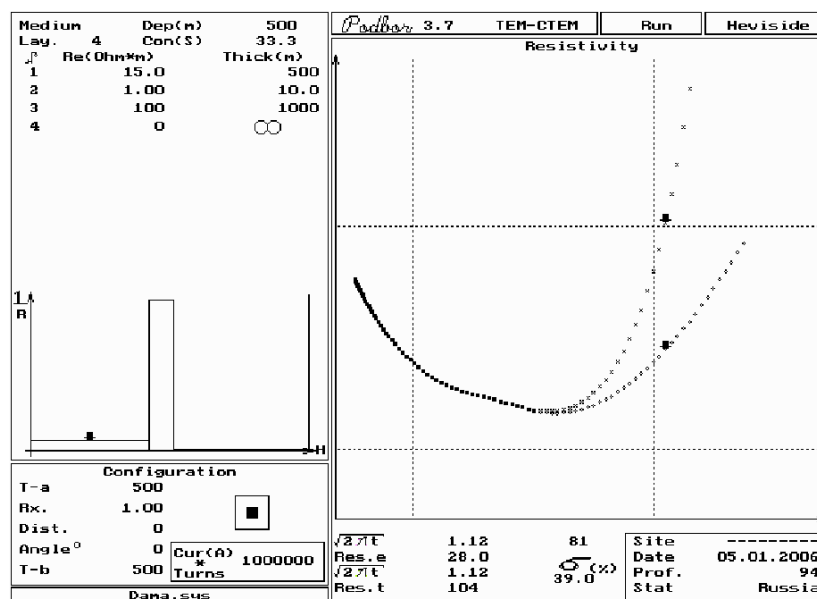


Рис.2.2. Сверхпроводящее основание

## 2.2 Комплекс Подбор для операционной системы DOS

Комплекс Подбор начал свое функционирование примерно в 1990 году в виде отдельной программы ПОДБОР, реализующей одномерную интерпретацию отдельного зондирования. Программа была создана в среде Борланд Паскаль под операционную систему DOS. Представление об интерфейсе программы можно составить по рис 2.1 и 2.2. В дальнейшем программа ПОДБОР была дополнена программами ПРОФИЛЬ, FAST3D, СЛОЙ и все вместе они составили комплекс Подбор для ОС DOS. Этот комплекс широко применялся около десяти лет, используется и сейчас, передан во многие учебные заведения. В нем произошло развитие и совершенствование алгоритмических и методических подходов, определены принципы сервисного обслуживания. Более того, не все алгоритмы и программы (особенно, исследовательского характера) вошли потом в позднейшие версии (в виде единой программы) под Windows. Еще можно заметить, что комплекс Подбор (DOS) породил целое семейство родственных программ: «морской» Подбор, аэровариант, СИТЕМ-программа для компенсационного метода переходных процессов (КМПП), Подбор-ЯМР. Поэтому мы считаем необходимым посвятить один раздел описанию комплекса Подбор под DOS.

Итак, комплекс Подбор составляют 4-е самостоятельных программных объекта (ПОДБОР, ПРОФИЛЬ, СЛОЙ, FAST3D), заключенные в единообразные, удобные сервисные оболочки, с единообразной системой ввода-вывода, документирования (файлы и твердые копии, графика и таблицы, rsx-формат) и оперативной помощи пользователю.

Взаимодействие между программными объектами можно проиллюстрировать с помощью следующей схемы, в которой использованы изображения «титальных» окон этих программ (рис 2.3):

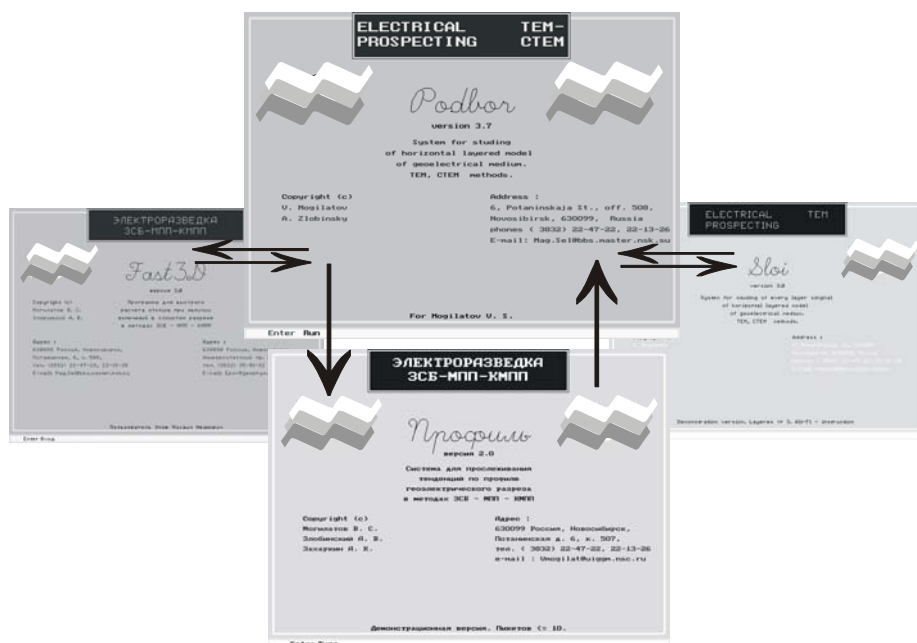


Рис.2.3. Комплекс Подбор и взаимодействие отдельных программ в комплексе

**ПОДБОР** - программа одномерной интерпретации данных одного пикета. Прямая задача - синтез известного частотного подхода и решения во временной области. Автоматическая инверсия возможна с помощью четырех процедур. Используется вариант прямой задачи для расчета производных по параметрам разреза.

**ПРОФИЛЬ** - система для разнообразных и регулируемых пользователем профильных представлений первичного материала, а также результатов интерпретации.

**FAST3D** - программа быстрого расчета влияния локальных нарушений горизонтальной однородности разреза на процесс становления. Алгоритм является модификацией метода возмущений. Программа удовлетворяет до некоторой степени потребность в неоднородном подходе при интерпретации, притом, в самом оперативном варианте. На современном PC время счета для 1-го объекта составляет меньше минуты.

**СЛОЙ** - программа для весьма детального анализа процесса становления в Вашей среде с Вашим импульсом возбуждения. Здесь можно оценить влияние каждого слоя с различных точек зрения. Вы сможете увидеть, каковы физические предпосылки для успешного решения Вашей задачи, а, может быть, они и недостаточны?

В создании этих программ участвовали в основном Могилатов В.С., Злобинский А.В. а также Захаркин А.К (ПРОФИЛЬ), Эпов М.И. и Антонов Е.Ю (один из алгоритмов программы FAST3D 3.0). Все вышеперечисленные продукты зарегистрированы на указанных авторов в РОСПАТЕНТ.

### 2.2.1 Задачи, которые можно решать в комплексе Подбор

Комплекс Подбор позволяет решать целый ряд задач на различных этапах проведения работ:

- Исследовать целесообразность проведения работ ЗСБ (МПП) в нужном районе.
- Провести любые методические и научные работы по поводу использования метода ЗСБ (МПП).
- Произвести послойную количественную интерпретацию результатов МПП (ЗСБ).

- Сделать обзор первичного материала, отредактировать его, провести предварительный анализ профильных данных на этапе качественной интерпретации, районировании территорий.

- Визуализировать профильные данные, как на основе кажущихся параметров результатов зондирований, так и на основе результатов их количественной интерпретации

- Обучить персонал работе с процессингом для МПП (ЗСБ) и самим основам этих методов.

Для решения этих задач программы, составляющие комплекс, обладают следующими качествами:

- Имеют быструю прямую задачу расчета поля для горизонтально-слоистой модели, позволяющую задавать любую форму импульса, любую шкалу времен, любое расположение генераторной и приемной петли, работающую для любых сред.

- В их состав входит 4-е различные процедуры решения обратной задачи, которые в зависимости от среды и знаний о ней позволяют различными путями подбирать разрез, фиксировать некоторые параметры среды, а также не учитывать в решении некоторые точки на полевой кривой.

- Удобно располагающиеся все возможные данные о пикете на мониторе, позволяющие сразу использовать всю имеющуюся информацию о разрезе.

- Хорошо продуманный ввод информации, который благодаря графическому представлению не позволяет делать ошибки ввода, возможность ввести любые данные в кодах ASCII любым редактором с любых устройств, это позволяет использовать данные полученные любой аппаратурой.

- Возможность просмотреть профиль по кажущимся данным при предварительной обработке, вывести их на принтер, просмотреть подобранный разрез, с учетом реальной поверхности земли и расстояния между пикетами, а также предусмотрен простой переход от просмотра профиля к расчету полевой модели.

- Представление рассчитанной кривой в виде полевых данных и вызов их как любые другие полевые данные, что полезно при методической работе

- Простота обучения и использования с самого начала ставилась, как одна из главных задач, поэтому работа с программами интуитивно понятна каждому специалисту – геофизику.

## **2.2.2 Программа ПОДБОР**

Основная программа Комплекса – программа ПОДБОР для одномерной интерпретации данных одного пикета. Данные отображаются в главном, рабочем окне программы (рис.2.4), где можно оперативно редактировать среду, производить теоретический расчет и сравнивать полевую и теоретическую кривые. Все остальные данные (установка, импульс, пикетаж, диапазон времен и полевая кривая) редактируются в специальном окне-редакторе. В программе ПОДБОР используются следующие основные вычислительные процедуры:

**Прямая задача. Программа MAG.** Программа написана на основе алгоритма, полученного методом пространственных гармоник, предложенным А.Н. Тихоновым и развитым нами на случай многослойных сред. Выше, в главе 1, дано описание этого алгоритма. Проблема ранних времен, вообще характерная для метода Тихонова, решается также за счет усечения нижней, не влияющей (на данном времени) части разреза. С другой стороны, ограничение метода (изолирующее основание) преодолевается введением достаточного мощного проводящего слоя, предшествующего основанию. Программа MAG, таким образом, вполне универсальна, однако она удобнее (быстрее) в

условиях изолирующего основания (при достаточном диапазоне регистрации, разумеется).

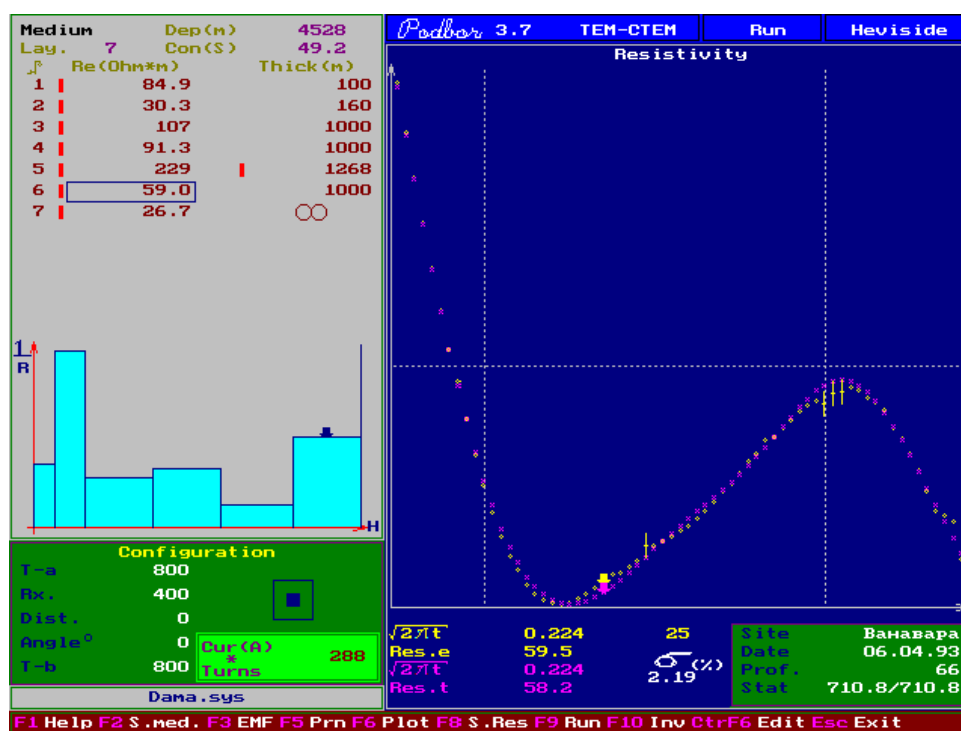


Рис.2.4. Основной интерфейс программы Подбор

**Прямая задача. Программа POL.** Если, однако, зондирования происходят в условиях сильно влияющего проводящего основания, предлагается пользоваться программой POL. Основной программой POL является численная трансформация Фурье частотного решения. Однако используется не полное решение в частотной области, а разность между полным решением для среды с проводящим основанием и решением с непроводящим. При этом численная реализация преобразования Фурье чрезвычайно облегчается за счет резкого сужения необходимого частотного диапазона. Во временной области производится добавление сигнала от среды с изолирующим основанием путем применения той же программы MAG.

По поводу прямых процедур нужно заметить, что в ранних версиях уповалось на «разумное» применение этих процедур в условиях соответствия реальных моделей реальному диапазону регистрации. Однако вскоре обнаружилось, что пользователи достаточно часто по разным причинам (неопытность и любопытство, например) выходят за эти рамки. Оперативно анализировать и запрещать все такие попытки весьма сложно и, пожалуй, некорректно по отношению к пользователю. В конце концов, пришлось обеспечить расчеты при самых «безумных» параметрах прямой задачи. При этом используются решения с идеально-проводящим основанием, на сверхпоздних временах привлекаются обобщающие модели ( $S$ -плоскость, двухслойка и пр.).

Решение обратной задачи, в том числе автоматическое, рассматривается в программе ПОДБОР, как составная часть текущего геофизического процесса, и предполагает некоторые априорные сведения о разрезе. Эти априорные сведения при обработке профильных наблюдений делятся на устойчивые, фиксируемые и на меняющиеся, подлежащие уточнению в окрестности некоторой величины (обычно, результата интерпретации на предыдущем пикете). По меняющимся (помечаемым пользователем) параметрам производится автоматическая минимизация суммы квадратов отклонений полевого и теоретического отклика. В программе ПОДБОР предлагается

четыре процедуры для применения в различных ситуациях в зависимости от качества стартовой модели.

**Обратная задача. Программа LEMA.** В программе LEMA применяется прямой алгоритм минимизации суммы квадратов отклонений нелинейных функций Левенберга-Марквардта [48], [49]. В этом алгоритме якобиан вычисляется с помощью вперед-направленной разностной аппроксимации. Таким образом, используется стандартная прямая процедура (либо программа MAG, либо POL).

Выше уже говорилось, что важной особенностью предлагаемого математического обеспечения является реализация процедуры решения прямой задачи (процедура MAGDA), обеспечивающей, помимо расчета самого отклика, также быстрый, по аналитическим формулам расчет производных отклика по параметрам модели. Это позволяет построить весьма оперативные процедуры решения обратной задачи. В программе Подбор имеются три программы, использующие процедуру MAGDA.

**Обратная задача. Программа NEWTON.** В программе NEWTON используется модификация метода Ньютона.

**Обратная задача. Программа AUTO.** В программе AUTO параметры разреза уточняются в результате линейной инверсии суммы квадратов отклонений, линейаризованной с помощью локального ряда Тейлора. Уточнение разреза производится за время, практически равное времени расчета прямой задачи.

**Обратная задача. Программа AUTO2.** Совершенно иначе используются производные в программе AUTO2. В окрестности стартовой модели строится линейаризованное решение прямой задачи. С ее помощью производится быстрый перебор в этой окрестности и находится минимальная сумма квадратов отклонений.

### 2.2.3 Программа ПРОФИЛЬ

Программа предназначена для отображения данных по профилю. Все файлы, относящиеся к одному профилю должны находиться в одной директории, и все файлы должны быть привязаны к одной шкале времени. Привязка к временной шкале предполагает что все времена, на которых проводятся измерения на всех пикетах, являются частью одной шкалы. Шкала времен, содержащая все времена, записана в файле 'Shcala.sys'.

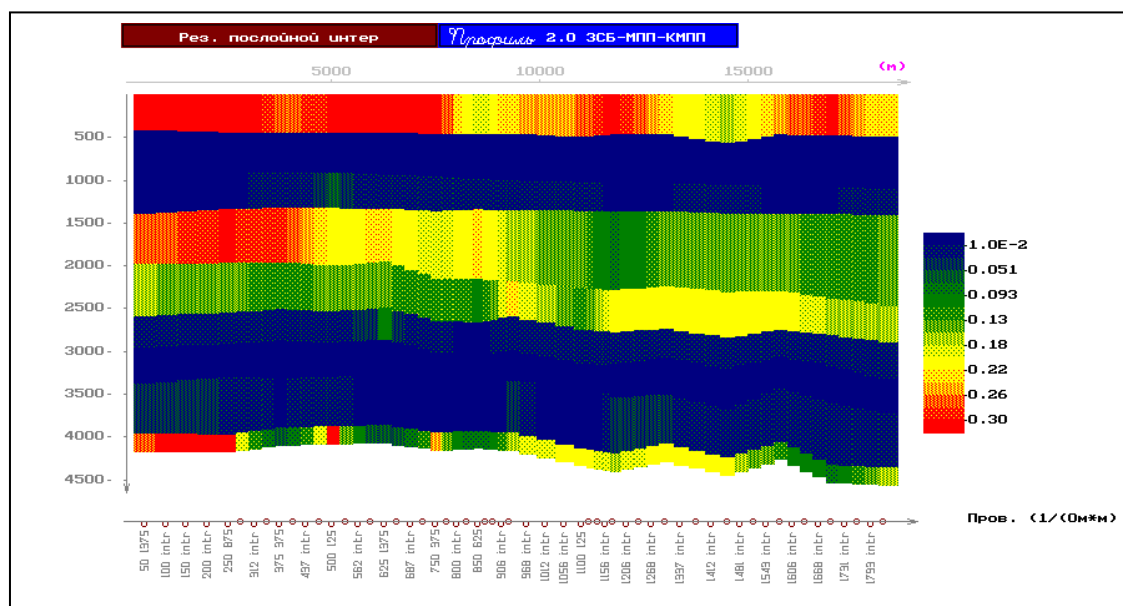


Рис.2.5. Представление разреза в программе ПРОФИЛЬ

Мы рекомендуем помещать в одну директорию программы ПОДБОР и ПРОФИЛЬ, в этом случае можно переходить из одной программы в другую, не возвращаясь в DOS. При такой организации работы появляется возможность оперативно редактировать какой-либо файл в редакторе ПОДБОР или, наоборот, посмотреть, как выглядят пикеты, соседние с тем, который сейчас обрабатывается ПОДБОР.

Программа позволяет упорядочивать файлы по возрастанию координаты X, по убыванию X, по возрастанию Y, по убыванию Y. Код, позволяющий выбрать тот или иной способ упорядочения файлов, задается в файле ColorPro.sys.

Первые три экрана программы предполагают, что в файлах содержатся данные о среде. Эти экраны позволяют работать с уже проинтерпретированными файлами, т.е. содержащими среду. Если данных о среде в файле нет, то данный пикет не будет отрисовываться в первых трех экранах программы. 1-ый позволяет просмотреть значения сопротивлений и мощностей по профилю после послойной интерпретации. 2-ой позволяет просмотреть диаграммы сопротивлений или проводимостей по профилю после послойной интерпретации, 3-ий позволяет визуализировать слои с помощью сопоставления различных цветов различным удельным сопротивлениям или удельным проводимостям после послойной интерпретации.

Экраны программы с 4-го по 9-ый предполагают, что в файлах содержатся полевые кривые. 4-ый отрисовывает кривые  $\rho_{\tau}$  (RoTau) повернутые на 90 градусов, 5-ый отрисовывает кривые  $\rho_{\tau}$ , 6-ой отрисовывает кривые  $S_{eff}$  (SEff), 7-ой отрисовывает значения ЭДС в отдельные моменты времени, 8-ой позволяет сделать цветовую градацию по  $\rho_{\tau}$ , 9-ый позволяет сделать цветовую градацию по  $S_{eff}$ .

Расстояние между пикетами учитывается при построении профилей во всех экранах, кроме первых двух (экран численной отрисовки и экран диаграмм). Расстояние между соседними пикетами высчитывается по формуле:

$$R = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}.$$

Сумма всех расстояний между пикетами, вычисленных по профилю, и является масштабирующим параметром для отрисовки профиля, не зависимо от того, отстраивается профиль вдоль прямой линии или нет. Во всех экранах, кроме первых двух, учитывается и превышение пикетов над нулевой точкой.

Следует отметить, что превышение над 0 точкой добавляется во все экраны, где участвует цветная отрисовка. При цветной отрисовке по параметрам  $\rho_{\tau}$  и  $S_{eff}$  глубина откладывается в логарифмическом масштабе. К глубине, участвующей в отрисовке, уже прибавлено превышение, поэтому следите, чтобы сумма минимального  $H_{eff}$  (HEff) и превышения не давали бы величину меньше 0. Все величины HEff, которые меньше 0, принимаются за 0 и отрисовываются одной горизонтальной линией. Можно рекомендовать за нулевую точку отсчета превышения брать не уровень моря, а самый низкий пикет на профиле. В отрисовке по уже проинтерпретированным пикетам используется линейный масштаб и превышение просто суммируется с глубиной. В экранах с цветной отрисовкой расстояние между пикетами делится пополам и по этой линии проходит раздел между цветом левого пикета и правого пикета.

Во всех экранах, где отрисовываются кривые, применяется логарифмический масштаб по осям X и Y. Центр кривой, относящейся к данному пикету, лежит прямо над именем пикета (кривая выводится теми же значками, какие нарисованы над именем пикета). Точка, соответствующая пикету на рисунке среза поверхности, лежит прямо над точкой с именем данного пикета.

При работе всегда можно узнать количественные характеристики. Для этого нужно перейти на нужную кривую и подвести курсор к интересующей точке. Переход на другую кривую и переход к другому пикету в данном случае одно и то же. Текущие значения выводятся всякий раз, как изменяется местоположение курсора.



При цветной отрисовке и при отрисовке ЭДС можно изменить цветовую шкалу. Введя минимальное и максимальное значения, шкала будет задана с новыми интервалами. Границы остальных интервалов вычисляются, исходя из начальных и конечных значений шкалы, в логарифмическом масштабе. В зависимости от начальных и конечных значений шкалы существенно меняется представление о разрезе, поэтому важно уделить этому внимание.

Предусмотрена возможность изменять начальное и конечное время при работе с экраном значений ЭДС в отдельные моменты времени.

Возможен вывод профилей в файл формата rsx, или непосредственно на 9-ти игольчатый матричный принтер. При непосредственном выводе на принтер возможно 2 варианта вывода:

- 1) вывод с 9 градациями серого,
- 2) вывод с 4 градациями серого.

Возможен альтернативный вариант вывода результатов работы - вывод в файл формата rsx. В этом случае получается цветное изображение профиля, которое можно обрабатывать любым графическим редактором. Такой стиль работы позволит получить любую отчетную документацию в наиболее подходящем виде. При сохранении профиля в файл формата rsx, необходимо задать соответствующий масштаб: количество метров реального профиля в одной точке на картинке. Все упомянутые масштабы задаются в файле ColorPro.sys.

Кроме масштабов для вывода профиля, в файле ColorPro.sys задаются начальные значения:

1) минимальное и максимальные значения удельного сопротивления ( $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ) в экране цветовой градации после послойной интерпретации в режиме градации по удельным сопротивлениям;

2) минимальное и максимальные значения удельной проводимости ( $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ ) в экране цветовой градации после послойной интерпретации по удельным проводимостям;

3) минимальное и максимальные значения удельного сопротивления ( $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ) в экране цветовой градации по кажущимся кривым;

4) минимальное и максимальные значения (по умолчанию) продольной проводимости ( $\text{См}$ ) в экране цветовой градации по кажущимся кривым Seff;

5) начальный и конечный номера значений (целые) в шкале времен (по умолчанию) для экрана отрисовки ЭДС.

Мы советуем присвоить всем перечисленным параметрам часто встречающиеся значения, тогда при входе в программу не будут возникать бессмысленные картинки профилей.

## 2.2.4 Программа FQAST3D

FAST3D -- программа для быстрого расчета аномального устанавливающегося поля локального нарушения в горизонтально-слоистом геоэлектрическом разрезе. Эта программа позволяет оперативно, возможно и в полевых условиях, проанализировать возмущения одномерной интерпретации. Это компромисс между большими системами для точного трехмерного моделирования, недоступными для производственного применения, и насущными требованиями практической работы. Программа FAST3D не имеет аналогов (быстрый расчет + быстрый и простой графический сервис).

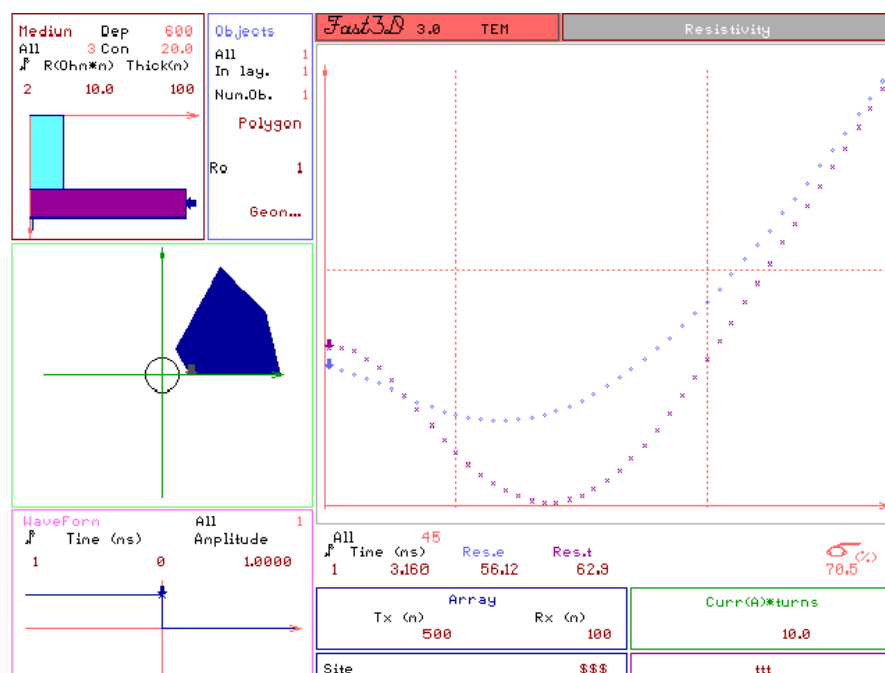


Рис.2.6. Интерфейс программы FAST3D

Класс 3D моделей - это локальные объекты в слоистой среде. Модель локального объекта задается очень просто. Нужно выбрать слой. Толщина этого слоя равна толщине объекта. Затем нужно задать форму объекта в плане и его сопротивление. Можно использовать два типа объектов. Первый тип - круги или кольца и части их (сектора). Второй тип - многоугольники.

Для каждого типа имеется свой быстрый приближенный алгоритм. Первый основан на замене объекта эквивалентным устанавливаемым распределением стороннего тока. Этот алгоритм основан на линеаризованном решении (глава 1). Во втором (авторы М.И.Эпов, Е.Ю.Антонов, следуя работе [29] ) алгоритме объект рассматривается, как возмущение границы между слоями.

Эти алгоритмы совершенно различны и (это весьма важно!) можно контролировать расчеты в конкретных геоэлектрических условиях, рассчитывая поле для одного и того же объекта (сектор, как многоугольник), применяя обе процедуры поочередно.

Полный цикл (задание среды - расчет - обзор результата -документирование) может занимать всего лишь несколько минут.

Конфигурация установки - "петля-петля", форма возбуждающего импульса тока - произвольная.

В программе FAST3D используются следующие основные процедуры:

**Программа MAG.** Прямая задача для произвольной горизонтально-слоистой среды - программа MAG. Та же, что используется в системе Подбор.

**Программа POL.** Прямая задача для произвольной горизонтально-слоистой среды на основе частотного подхода.

**Программа MAG3D.** Процедура расчета аномального поля неоднородности - программа MAG3D. Алгоритм основан на замене геоэлектрической неоднородности вторичными сторонними источниками, распределение и изменение во времени которых контролируется нормальным полем (полем вмещающей слоистой среды).

**Программа CUPOLN3.** Процедура расчета аномального поля неоднородности - программа CUPOLN3. В алгоритме неоднородность рассматривается, как возмущение границы вмещающего разреза.

## 2.2.5 Программа СЛОЙ

Диалоговая электроразведочная программа СЛОЙ предназначена для подробного анализа процесса установления в горизонтально-слоистой среде, в особенности, для анализа эффективности применения оптимизированных форм возбуждающего импульса. Анализ основан на двух подходах.



Рис.2.7. Интерфейс программы СЛОЙ

Первый состоит в визуализированном представлении расчетов относительного вклада каждого слоя горизонтально-слоистого геоэлектрического разреза в суммарную ЭДС от импульсов тока различной формы. Второй подход состоит в визуализированном представлении чувствительностей отклика к изменениям параметров разреза при определенном режиме возбуждения.

Программа полезна на стадии проектирования электроразведочных работ методами переходных процессов при использовании стандартных методик или модифицированных. Программа позволяет весьма наглядно оценить физические предпосылки (может быть, они недостаточны?) для решения задач проектируемых работ.

Методическая работа проведенная с этой программой позволяет:

- 1) Узнать целесообразность проведения работ ЗСБ, МПП в нужном районе
- 2) Определить вклад любого слоя в сигнал ЗСБ, МПП.
- 3) Предоставляет новую возможность определить влияние слоя на процесс становления. Позволяет определить процентный вклад каждого горизонта в сигнал МПП.

В программе Слой используются следующие основные процедуры:

**Прямая задача. Программа MAG.** Прямая задача для произвольной горизонтально-слоистой среды (процедура MAG программы ПОДБОР).

**Прямая задача. Программа MAGST.** Программа MAGST реализует алгоритм, описанный выше (глава 1). Теоретический отклик рассчитывается как сумма вкладов от каждого слоя горизонтально-слоистой среды на каждом времени установления и в зависимости, разумеется, от вида импульса возбуждения.

**Прямая задача. Программа MAGDA.** Процедура расчета производных по сопротивлениям и мощностям каждого слоя в горизонтально-слоистой среде (процедура MAGDA программы ПОДБОР).

### **2.2.6 Выводы по применению комплекса Подбор (DOS)**

Более чем десятилетнее широкое использование комплекса Подбор в практике электроразведочных работ методом ЗСБ (МПП) с различными целями (нефть, руда, вода) позволяет утверждать, что комплекс является признанным и эффективным математическим обеспечением этих методов. Вместе с тем, нужно отметить, что использовались, практически, лишь программы ПОДБОР и ПРОФИЛЬ. Программы FAST3D и СЛОЙ оказались гораздо менее востребованы. Авторы все же считают, что эти программы обладают высокими потенциальными возможностями, опередившими, можно сказать, свое время. В то же время, невостребованность такой программы как FAST3D свидетельствует также о некотором застое в упомянутых методах, о слишком затянувшейся приверженности к одномерному подходу при интерпретации.

## 2.3 Система Подбор для операционной системы Windows

### 2.3.1 Общее описание

Система Подбор для Windows (последняя выпущенная версия 4.81) является непосредственным развитием комплекса Подбор для DOS. Система включила в себя все проверенные временем удачные разработки из прежних версий и большое количество новых возможностей. Разработка системы была проведена группой авторов в составе: Могилатов В.С., Злобинский А.В., Захаркин А.К. Продукт зарегистрирован на данную группу авторов в РОСПАТЕНТе.

Система предназначена для построения и вывода на печать (или в другие системы построения данных, например Surfer) разнообразные и регулируемые Пользователем профильные (площадные) представления первичного материала, а также результатов интерпретации.

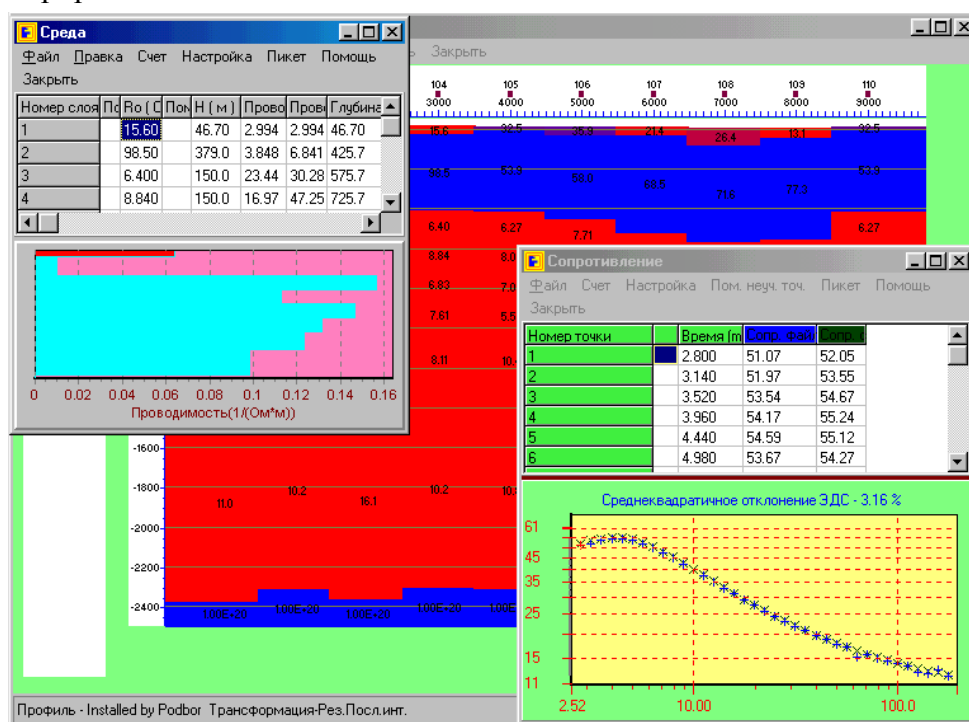


Рис.2.8. Рабочие окна системы Подбор (Windows)

Одна из важнейших возможностей Системы - обоснованное расчленение и параметризация георазреза по результатам зондирования на конкретном пикете. Обработка данных пикета для нахождения горизонтально-слоистого геоэлектрического разреза, ответственного за процесс становления на этом пикете. При этом возможно как прямое сопоставление полевой и теоретических многослойных кривых, так и предварительный тщательный анализ особенностей кривых кажущихся величин, а затем уже проверка наблюдений расчетами. Предлагается возможность учитывать реальную форму питающего импульса.

Система позволяет быстро рассчитать влияние локальных нарушений горизонтальной однородности разреза (3-х мерная прямая задача) на процесс становления. Алгоритм является модификацией метода возмущений.

Система имеет встроенные базы данных для измерений по площадям (профилям), которые хранят всю Вашу информацию в удобном для Вас виде.

Система рассчитана на использование любых типов установок – петля в петле, разнесенные, с закрепленным источником и т.д.

Система имеет удобный интерфейс пользователя, легка в использовании, снабжена подробной системой Помощи и поставляется с методическими указаниями по использованию.

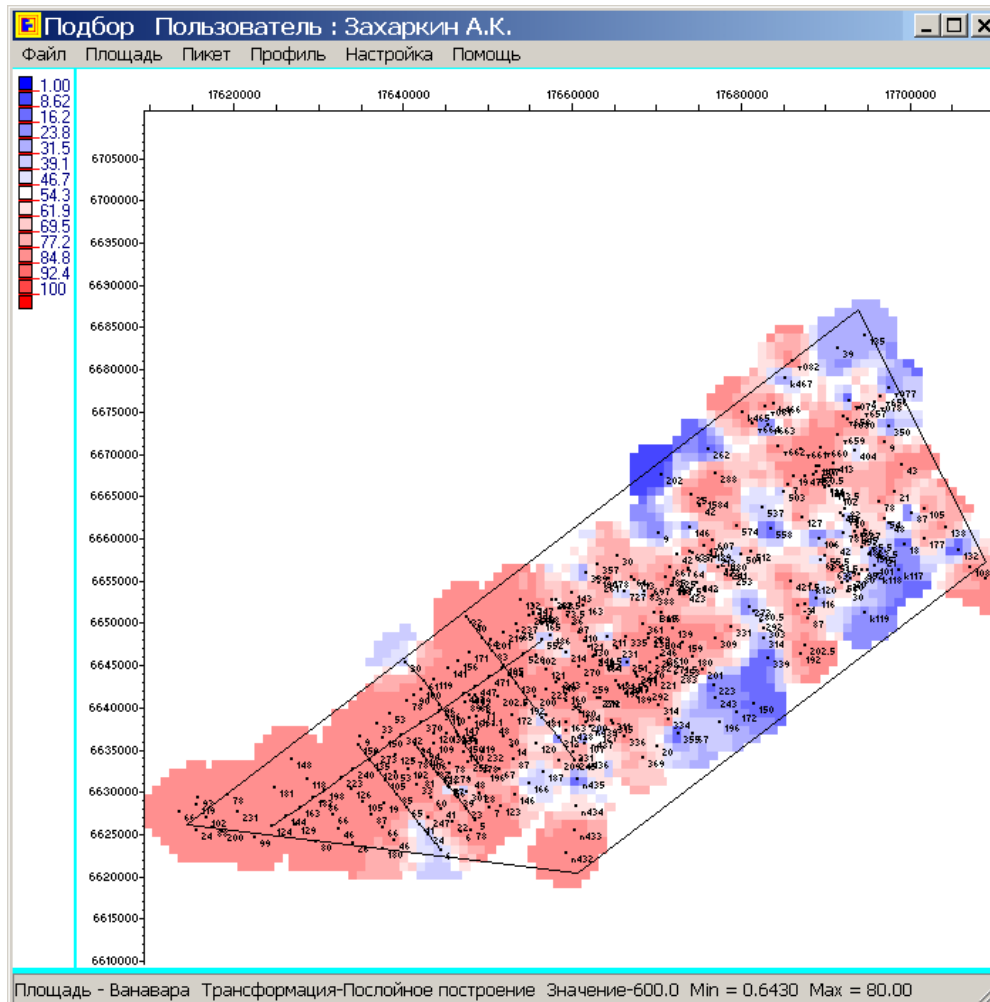


Рис.2.9. Окно площадной визуализации

### 2.3.2 Окно площадной отрисовки.

При запуске Системы пользователь попадает в окно площадной отрисовки, из которого можно вызвать окно профильной отрисовки, окно профильной отрисовки «Линии» и окна для обработки отдельного пикета: «Среда», «ЭДС», «RoTau», «STau», «Разность», «Установка», «Импульс», «Дополнительная информация», «Объекты».

Окно площадной визуализации служит для представления и редактирования результатов проведения площадных работ.

При проведении площадных работ мы можете объединить некоторые пикеты в площадь (под произвольным именем), для совместного представления информации о пикетах. Система записывает названия файлов, координаты пикетов и название площади в свою базу данных. В дальнейшем можно оперировать с площадью, как с единым целым.

Способ представления информации по площади зависит от используемой трансформации и настройки вида площади.

Система считывает информацию из файлов пикетов, включенных в данную площадь. В качестве координат пикетов используются координаты X и Y, записанные в соответствующих файлах пикетов. Всегда можно объединить информацию об обработанных пикетах в новую площадь или добавить (удалить) пикеты в уже существующие площади.

Можно выбрать трансформацию из списка предлагаемых системой трансформаций, вызвать процедуры послойной интерпретации результатов.

Всегда можно получить всю информацию по пикету - просто два раза щелкнуть мышкой по его изображению или через меню - Пикет - обработать пикет.

Чтобы узнать значение параметра в любой точке на карте, достаточно нажать левую кнопку мыши в интересующем месте на карте.

### 2.3.2.1 Построение карты.

Построение карты делится на пять этапов :

1) определить значения трансформации в пикетах – для каждого пикета определяется значение на выбранной глубине или в выбранный момент времени (в зависимости от трансформации). В дальнейшем для построения карты учитывается только значения для каждого пикета в данный момент времени (на данной глубине). Значения в другие моменты времени (на других глубинах) в рассмотрение не принимаются.

2) Вычисляются координаты интерполяционных точек. Размер выводимой карты и количество вычисляемых интерполяционных точек задаются в настройках. Например, если по оси X количество вычисляемых точек 100 и размер 400, то это будет означать, что сама картинка будет занимать на экране (и в графических растровых файлах ) 400 пикселей, а минимальный элемент изображения будет прямоугольник со стороной по  $X_s = 400/100 = 4$  пикселям. Далее вычисляются координаты центра каждого элемента изображения :

$$X_m = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{K_x} * m ,$$

где  $X_{\max}$  –максимальное значение X на карте,  $X_{\min}$  –минимальное значение X на карте,  $K_x$  – количество вычисляемых точек по оси X,  $m$  – номер вычисляемой точки. Чем меньше будет  $X_s$ , тем качественнее будет изображение картинки, и тем дольше она будет рассчитываться (не стоит делать это число меньше 1).

3) Определяются ближайшие к интерполяционной точке пикеты, только их значения участвуют в расчете значения в точке. Вокруг каждой точки проводятся 2 окружности с радиусами  $R_d$  и  $R_k$ . Оба эти радиуса задаются в настройках.

Значение в точке рассчитывается, если в окружности с радиусом  $R_k$  есть хотя бы один пикет. В расчетах участвуют все пикеты, попадающие в окружность с радиусом  $R_d$ .

При излишнем уменьшении параметра  $R_d$  может оказаться, что в некоторых точках система не сможет вычислить значение ( нет пикетов с разрешенным удалением ), а при излишнем увеличении будут приниматься во внимание значения пикетов, которые явно находятся вне пределов влияния исходя из обычной логики представления материала.

При излишнем уменьшении параметра  $R_k$  может оказаться, что в некоторых точках система не сможет вычислить значение ( нет пикетов с разрешенным удалением), а при излишнем увеличении будут вычисляться значения за краями площади, информацией о которых мы явно не располагаем.

4) Вычисляется значение в точке. В зависимости от настройки опций применяется или первая или вторая формула. Формулы отличаются весовыми коэффициентами расстояний от точки до пикета.

$$1) Z := Zb + \sum_m \frac{(Zm - Zb) * Rb^2}{2 * Rm^2},$$

$$2) Z := Zb + \sum_m \frac{(Zm - Zb) * Rb}{2 * Rm},$$

где  $Z$  – значение в точке.  $Zb$  – значение в ближайшем пикете.  $Zm$  – значения в остальных пикетах, расстояние до которых меньше, чем  $Rd$ .  $Rb$  – расстояние до ближайшего пикета.  $Rm$  – расстояния до остальных пикетов, расстояние до которых меньше, чем  $Rd$ .

5) Просматривается значение цветовой шкалы и точке присваивается соответствующий цвет. Далее выводится прямоугольник на экран с центром соответствующим  $Xm$ , стороной  $Xs$  и соответствующим цветом.

Хочется сразу отметить, что перед разработчиками стояла задача, создать оперативную процедуру построения карт данных электроразведки. Пакет, даже достаточно сложный, но рассчитанный исключительно на цели электроразведки, не может конкурировать со сложными системами построения карт, например SURFER. И вышеописанная процедура отлично справляется с оперативным построением карт, а при необходимости окончательный вариант для сдачи обработанного материала можно вывести любой системой построения карт.

### 2.3.2.2 Представление данных

В левой части окна выводится шкала цветов (цвет и соответствующие границам значения). В зависимости от трансформации и параметров сглаживания рассчитываются значения в каждой точке площади, и в соответствии с рассчитанным значением выбирается цвет, которым эта точка выводится на графике.

Слева и сверху от изображения площади выводятся координаты пикетов площади. Возможно выводить дополнительные линии, Профили введенные в окне профиль, Изображения пикетов. Настройка проводится через опции окна. Настройка параметров интерполяции, размеров карты и максимальных (минимальных) значений координат проводятся через меню Изображение - Вид площади.

Внизу окна выводится Название текущей площади, название трансформации, значение на котором рассчитана трансформация и минимальное, максимальное значения на площади.

### 2.3.2.3 Трансформации используемые для представления площади.

Уже введенные в Систему трансформации:

- 1) ЭДС (мВ) от времени (мс).
- 2)  $R\sigma$  от времени (мс).
- 3)  $S\sigma$  от времени (мс).
- 4) Построения результатов сопротивлений послойной интерпретации ( $\Omega \cdot m$ ) от глубины (м).
- 5) Построения результатов ЗСБ от времени (мс), координат центра генератора, степени расстояния от точки измерения до центра генератора и безразмерного множителя.
- 6)  $SEff$  от времени (мс).
- 7) Построения результатов сопротивлений послойной интерпретации ( $\Omega \cdot m$ ) от глубины (м) с учетом альтитуды пикетов.
- 8) Мощность слоя (м) в послойной интерпретации от номера слоя.



- 9) Мощность слоя (м) в послойной интерпретации от номера слоя отсчитываемого от нижнего слоя.
- 10) Проводимость слоя (См) в послойной интерпретации от номера слоя.
- 11) Проводимость слоя (См) в послойной интерпретации от номера слоя отсчитываемого от нижнего слоя.
- 12) Глубина кровли слоя (м) в послойной интерпретации от номера слоя.
- 13) Глубина кровли слоя (м) в послойной интерпретации от номера слоя отсчитываемого от нижнего слоя.
- 14) Глубина кровли слоя (м) с учетом альтитуды пикетов в послойной интерпретации от номера слоя.
- 15) Глубина кровли слоя (м) с учетом альтитуды пикетов в послойной интерпретации от номера слоя отсчитываемого от нижнего слоя.
- 16) Суммарная проводимость (См) в послойной интерпретации.
- 17) Дополнительное значение 1 введенное в описании пикета через меню площади  
Файл - Дополнительная информация по площади.
- 18) Дополнительное значение 2 введенное в описании пикета через меню площади  
Файл - Дополнительная информация по площади.
- 19) Дополнительное значение 3 введенное в описании пикета через меню площади  
Файл - Дополнительная информация по площади.

#### 2.3.2.4 Настройка вида площади

Рис.2.10. Окно настройки вида площади

В зависимости от этих настроек выбираются различные способы интерполяции значений в точках между пикетами и масштаб выводимой карты. Подробно процесс вычисления описан в пункте «Построение карты».

В левом верхнем углу выбирается, с какими весовыми коэффициентами будут учитываться значения пикетов. По умолчанию стоит весовой коэффициент квадратный.

В левой части окна вводится размер вычисляемой картинки площади (в пикселях) и количество вычисляемых интерполяционных точек – значения  $X_s$ ,  $Y_s$ . Чем меньше будет это число тем качественнее будет изображение картинки и тем дольше она будет рассчитываться (не стоит делать это число меньше 1).

В правой части окна вводятся параметры интерполяции. Если активирован флажок (Относ. Мин), то параметры вводятся в минимальных расстояниях между пикетами. Т. е. рассчитываются все расстояния между каждым двумя пикетами и выбирается наименьшее из них. При регулярной сетке этот параметр очень удобен для нормировки всех расстояний.

1) R-дейст - параметр вычисляемый или в минимальных расстояниях между пикетами или в метрах, в зависимости от установленного флажка (Нормировка). Если активирован флажок (Относ. Мин), то параметр задается в минимальных расстояниях между пикетами. Параметр определяет на каком максимальном расстоянии пикет будет оказывать влияние на значение в вычисляемой точке. Например, при квадратной сетке измерений вполне хватит значения 1 (при нормировке на мин. расстояние между пикетами). При излишнем уменьшении этого параметра может оказаться, что в центре квадрата система не сможет вычислить значение (нет пикетов с разрешенным удалением), а при излишнем увеличении будут приниматься во внимание значения пикетов, которые явно находятся вне пределов влияния исходя из обычной логики представления материала.

2) R-край - параметр вычисляемый или в минимальных расстояниях между пикетами или в метрах в зависимости от установленного флажка (Нормировка). Если активирован флажок (Относ. Мин), то параметр задается в минимальных расстояниях между пикетами. Он определяет на каком минимальном расстоянии хотя бы к одному пикету должна находиться вычисляемая точка, чтобы вычисления состоялись. При излишнем уменьшении этого параметра может оказаться, что в центре квадрата система не сможет вычислить значение (нет пикетов с разрешенным удалением), а при излишнем увеличении будут вычисляться значения за краями площади, информацией о которых мы явно не располагаем.

Кроме того, возможно ввести верхнюю и нижнюю границу значений в пикетах. Если значение пикета выходит за эти рамки, то его значение автоматически приравнивается верхнему (нижнему) краю разрешенных значений. Это полезно, например, при выводе данных после послойной интерпретации. Если на выбранной глубине встречается непроводящий слой, то его удельное сопротивление может быть сколь угодно большим и неоправданно увеличивать значения удельного сопротивления вокруг пикета.

Максимальное и минимальное значение координат по  $X$  и  $Y$  задается установкой флажка (Шкала). Если выбрано значение относительные, то минимальное и максимальное значения координат выбираются в соответствии с максимальными и минимальными значениями координат пикетов.

Если выбрано значение абсолютные, то масштабируется на значения, введенные в окошках  $Min X$ ,  $Max X$ ,  $Min Y$ ,  $Max Y$ .

### **2.3.2.5 Редактирование площади.**

#### **2.3.2.5.1 Добавить пикет в площадь.**

При вызове этой процедуры можно добавить новые пикеты из файлов. Для этого нужно выбрать имена файлов (если файлов больше 1, то их можно выбирать нажимая Shift и стрелки, или перечисляя через пробел и выделяя названия кавычками). Все файлы

должны соблюдать Формат файла данных Системы Подбор. После считывания файлов Система добавит информацию о новых пикетах в текущую площадь.

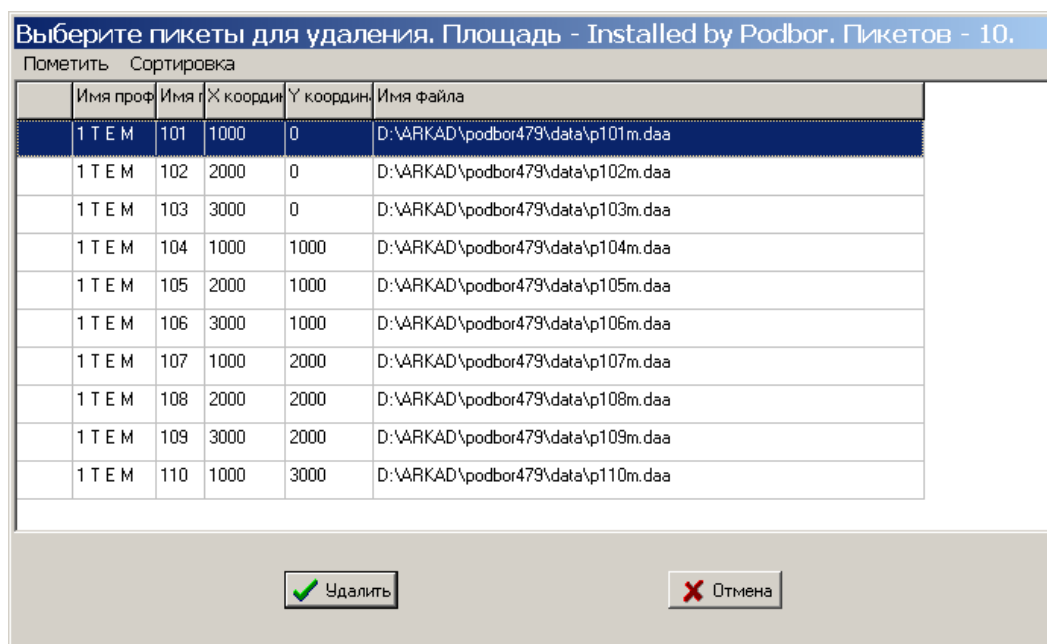


Рис.2.11. Добавление (удаление) пикетов в площадь

### 2.3.2.5.2 Удалить пикет

При вызове этой процедуры можно удалить пикеты из текущей площади. Для этого нужно пометить пикеты для удаления в предлагаемом списке. Помеченные пикеты выделяются в первой колонке галочкой. Пикеты можно пометить или через меню, или два раза кликнув мышкой в первой колонке. Возможно пометить сразу все файлы через меню Пометить - пометить все пикеты. Все помеченные пикеты будут удалены из площади после нажатия клавиши «Удалить».

Сортировку пикетов, входящих в площадь можно задать войдя в меню сортировка. Сортировка возможна по

- 1) имени файла
- 2) имени пикета
- 3) имени профиля

### 2.3.2.5.3 Новая площадь.

**Введите название площади**

Название площади	Количество файлов
Inst1	10
Installed by Podbor	10
▶ Maloglub	1106
Maloglub 2	315
Maloglub 3	1106
Udallnst	3
VanSosCvadr	900

Имя	X ( м )	Y ( м )	Имя файла
▶ 000	9886	11262	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.000
001	9904	11273	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.001
002	9922	11285	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.002
003	9939	11296	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.003
004	9957	11308	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.004
005	9975	11319	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.005
006	9991	11329	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.006
007	10008	11338	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.007
008	10024	11348	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.008
009	10041	11358	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.009
010	10057	11367	D:\ARKAD\maloglub\moi\obrab\YDIN210.010

Введите название площади

Рис.2.12. Новая площадь

При вызове этой процедуры можно создать новую площадь. После предложения Системы введите название новой площади. Новая площадь станет текущей площадью. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе площадями, и таблица пикетов входящих в каждую площадь.

### 2.3.2.5.4 Открыть площадь

При вызове этой процедуры можно выбрать текущую площадь из списка ранее введенных площадей. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе площадями, и таблица пикетов входящих в каждую площадь.

### 2.3.2.5.5 Сохранить площадь

При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущей площади в базе данных Системы. Система заново запишет список пикетов в базу данных Системы, а также все привязанные Дополнительные линии, Выводимые профили,

Дополнительную информацию по площади, Среду по умолчанию. При запоминании площади, запоминаются и некоторые параметры настройки площади.

- 1) Размер площади в пикселях.
- 2) Количество вычисляемых точек.
- 3) R-Действующий
- 4) R-края
- 5) Максимально возможное значение в пикетах.
- 6) Минимально возможное значение в пикетах.
- 7) Код цветовой шкалы.
- 8) Код трансформации.
- 9) Значение трансформации.
- 10) Признак вывода на экран Карты – рассчитанные значения.
- 11) Признак вывода на экран Изображения пикетов.
- 12) Признак вывода на экран Названий пикетов.
- 13) Признак вывода на экран Дополнительных линий.
- 14) Признак вывода на экран Введенных профилей.
- 15) Размер изображения пикетов.
- 16) Ширину оси Y.
- 17) Высоту оси X.
- 18) Масштаб печати по X при выводе в Word.
- 19) Масштаб печати по Y при выводе в Word.
- 20) Отступ при печати по X ( см) при выводе в Word
- 21) Отступ при печати по Y ( см) при выводе в Word

Существует возможность их считать при открытии новой площади ( необходимо поставить соответствующий флаг в опциях ).

#### **2.3.2.5.6 Сохранить площадь как**

При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущей площади в базе данных Системы под другим именем. Система запишет список пикетов в базу данных Системы под новым именем, а также всю дополнительную информацию - Дополнительные линии, Выводимые профили, Дополнительную информацию по площади, Среду по умолчанию. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе площадями, и таблица пикетов входящих в каждую площадь.

#### **2.3.2.5.7 Удалить площадь**

При вызове этой процедуры можно удалить площадь из базы данных Системы. Для этого нужно выбрать удаляемую площадь из предлагаемого списка площадей уже введенных в Систему. Удалится вся информация о площади – Список пикетов, Дополнительные линии, Выводимые профили, Дополнительная информация по площади, Среда по умолчанию. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе площадями, и таблица пикетов входящих в каждую площадь.

#### **2.3.2.6 Дополнительные возможности окна площадной отрисовки**

1) Сохранить изображение (Меню-Площадь-Сохранить изображение). При вызове этой процедуры Можно записать изображение площади в графический файл (перед записью выберите один из следующих форматов – bmp, psx, gif, tif, pct, eps, pcd ).

2) Создать файл для других систем (Меню-Площадь-Создать файл для других систем). При вызове этой процедуры можно записать файл в формате других систем

построения карт ( Surfer, Geo Soft). В файл выводятся координаты пикета, значение трансформанты, название пикета, название профиля.

3) Создать файл формата Word с подготовленной для печати картой и цветовой шкалой. Масштаб и отступы от краев листа, задаются в опциях. Файл создается на основе шаблона содержащегося в файле \template\etkart.doc. Можно изменить шаблон по своему усмотрению. При выводе в Word необходимо помнить, что этот редактор не обеспечивает высокую точность масштабирования, не лучше 0.2 %, и не позволяет печатать большие карты.

4) Копия экрана (Меню-Площадь-Копия экрана).

5) Дополнительные линии на площади (Меню-Файл-Линии).

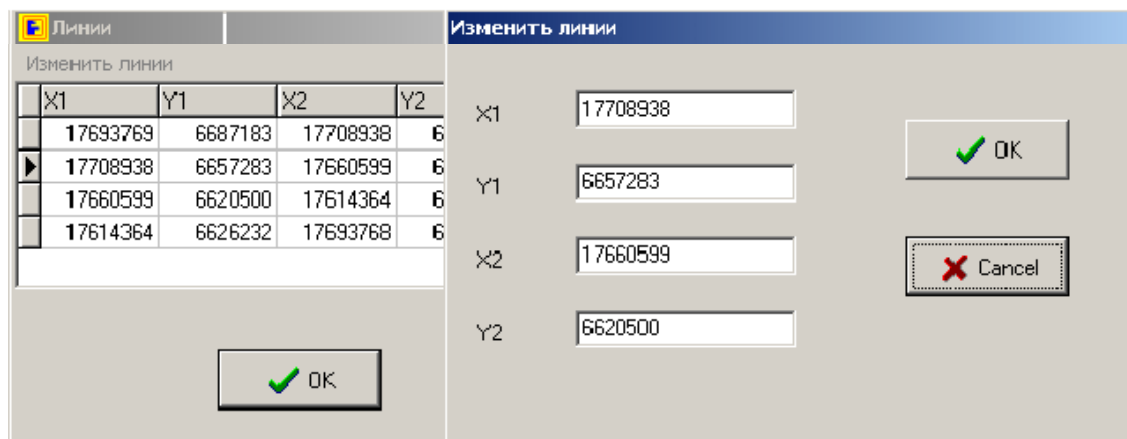


Рис.2.13.

Дополнительные линии можно ввести, например для обозначения интересующего Вас участка на площади. Линии привязаны к конкретной площади, для каждой площади нужно вводить свои линии. Если сохранить площадь под другим именем, то привязанные к площади линии, выводимые профили и дополнительные значения по площади будут привязаны к новой и старой площадям.

Для ввода дополнительных линий нужно открыть окно дополнительных линий через меню окна площади Файл – Линии. Для добавления новой линии нужно выбрать меню – Изменить линии – Добавить линию. В открывшемся окне диалога введите координаты X, Y обоих концов линии. Для удаления линии выбирается меню – Изменить линии – Удалить линию. Для изменения координат уже существующей линии выберите меню – Изменить линии – Изменить линию. В открывшемся окне диалога введите новые координаты X, Y обоих концов линии. Для добавления новой линии с координатами такими же, как у текущей линии выберите меню – Изменить линии – копировать линию.

Введенные линии можно выводить на экран, а можно не выводить. Это определяется настройкой опций через меню Файл - Опции.

6) Выводимые профили.

Можно вывести профили на площади. Для этого нужно привязать к площади профили введенные до этого. Профили вводятся в окнах Профильных отрисовок, меню Профиль –Профиль и Профиль –Профиль “Линии”.

Для привязки профилей к данной площади выберите меню - Файл - Выводимые Профили. В открывшемся окне выводится список всех профилей привязанных к площади. Список профилей можно изменить : добавить профиль, удалить профиль, удалить все профили из списка.

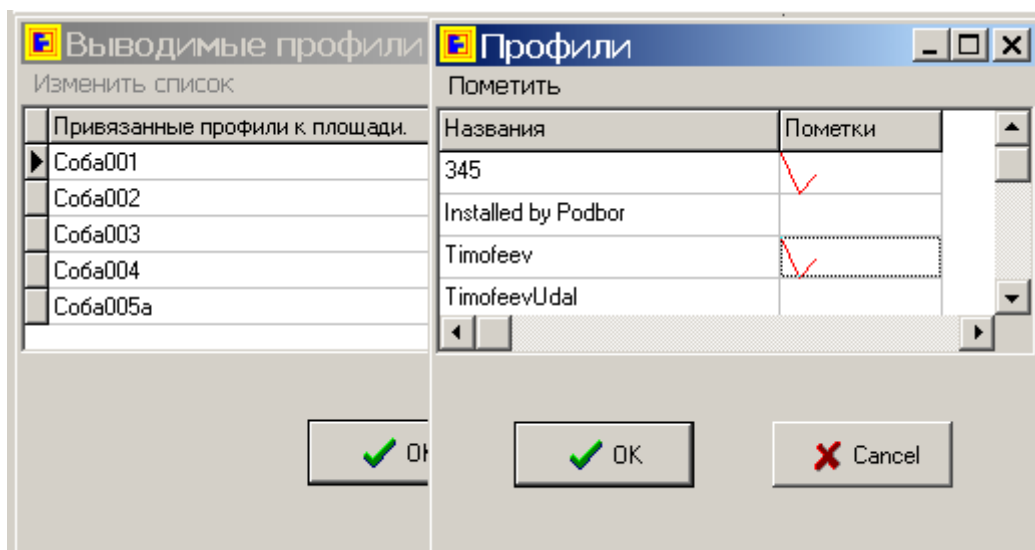


Рис.2.14. Вывести профили

Для добавления нового профиля в список, выберите меню Изменить список – Добавить Профиль. Будет предложен список всех введенных ранее в Систему профилей, кроме уже привязанных к данной площади. Отметьте галочкой те профили, которые должны быть привязаны к площади. Пометить профиль можно два раза щелкнув кнопкой мыши по правому столбцу напротив названия профиля или через меню. Через меню можно пометить все профили, распометить все профили, пометить текущий профиль.

Для удаления профиля из списка, выберите меню Изменить список – Удалить Профиль.

Для удаления всех профилей из списка, выберите меню Изменить список – Удалить все Профили.

Введенные профили можно выводить на экран, а можно не выводить. Это определяется настройкой опций через меню Файл - Опции.

**Ввод дополнительных значений**

Файл

Название площади	Количество ф
Inst1	10
Installed by Podbor	10
Maloglub	1106

Имя пикета	X (м)	Y (м)	Имя файла	Доп. зн. 1	Доп. зн. 2	Доп. зн. 3
003	10483	11397	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.003	0	0	0
004	10469	11412	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.004	0	0	0
005	10456	11427	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.005	0	0	0
006	10442	11443	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.006	0	0	0
007	10429	11458	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.007	0	0	0
008	10415	11473	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.008	0	0	0
009	10402	11487	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.009	0	0	0
010	10388	11502	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.010	0	0	0
011	10375	11516	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.011	0	0	0
012	10361	11531	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.012	0	0	0
013	10350	11544	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.013	0	0	0
014	10339	11556	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.014	0	0	0
015	10328	11569	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.015	0	0	0
016	10317	11581	D:\ARKAD\MALOGGLUB\MOI\OBRAB\YDIN003.016	0	0	0

OK

Рис.2.15. Дополнительная информация

#### 7) Дополнительная информация по площади.

Можно ввести дополнительные значения для каждого пикета площади. Это может быть любое число. Затем, выбрав трансформацию “Дополнительные значения 1 (2, 3)” из списка трансформаций через меню Изображение - Трансформация, можно построить площадную визуализацию по введенным значениям.

Для ввода дополнительной информации по пикету откройте окно Дополнительная информация по площади, меню - Файл - Дополнительная информация по площади. Выберите интересующую площадь. Под названием площади будет выведен список всех привязанных к площади пикетов. В столбцах Доп.зн.1, Доп.зн.2, Доп.зн.3 введите дополнительные значения для каждого пикета.

8) Среда по умолчанию. Можно ввести любую среду и привязать ее к площади. При обработке пикетов, во время подбора среды, среду по умолчанию можно будет использовать как стартовую.



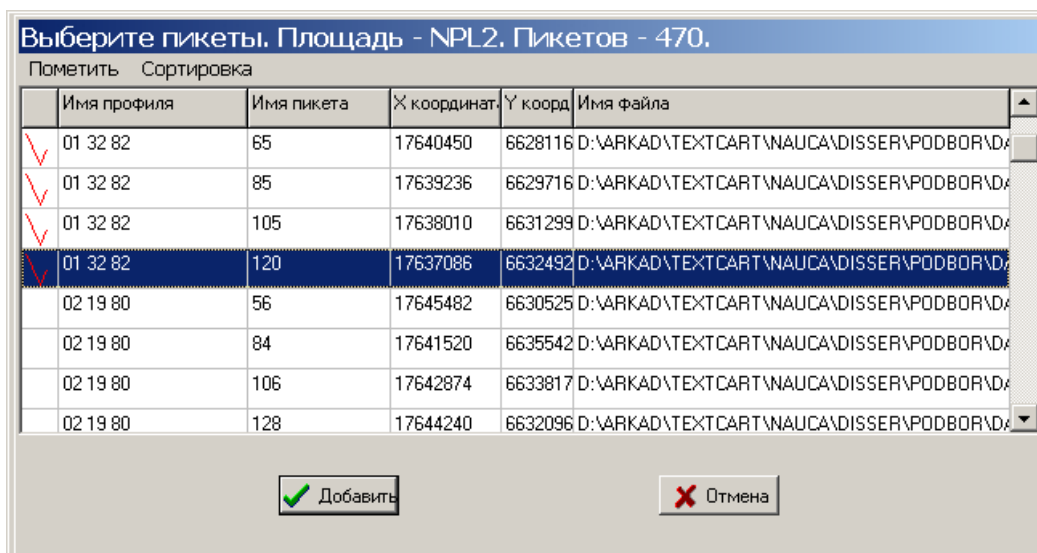


Рис.2.16. Новый профиль

9) Из пикетов, входящих в площадь можно создать новый профиль, он автоматически будет привязан к текущей площади (рис.2.16). Через меню - Файл – Новый профиль пользователь попадает в таблицу со списком всех пикетов входящих в площадь. Сортировку пикетов, входящих в площадь можно задать, войдя в меню сортировка. Сортировка возможна по:

- 1) имени файла
- 2) имени пикета
- 3) имени профиля

Для добавления пикета в новый профиль, его необходимо пометить – два раза кликнуть мышкой по первому столбцу таблицы в соответствующей строке или через меню – Пометить. После нажатия кнопки Добавить будет предложено окно для ввода названия нового профиля ( в качестве справочной информации предлагается список уже введенных ранее профилей ).

### 2.3.2.7 Опции окна площадной отрисовки.

Через меню Настройка - Опции пользователь попадает в окно настройки Окна, где:

- 1) можно задать язык Системы.
- 2) можно задать размер изображения пикетов.
- 3) можно задать ширину оси Y.
- 4) можно задать высоту оси X.

Параметры вывода в Word

- 5) Масштаб печати по X при выводе в Word
- 6) Масштаб печати по Y при выводе в Word
- 7) Отступ при печати по X ( см ) при выводе в Word
- 8) Отступ при печати по Y ( см ) при выводе в Word

Возможно задать выводить или не выводить на экран:

- 1) Карту – рассчитанные значения (флажок Карта)

- 2) Изображения пикетов (флажок Пикеты)
- 3) Названия пикетов (флажок Названия пикетов)
- 4) Дополнительные линии (флажок Линии )
- 5) Введенные профили (флажок Профили)

Возможно, пользуясь меню Настройка - Цвета, Шрифты, задавать цвета и шрифты соответствующих надписям элементов.

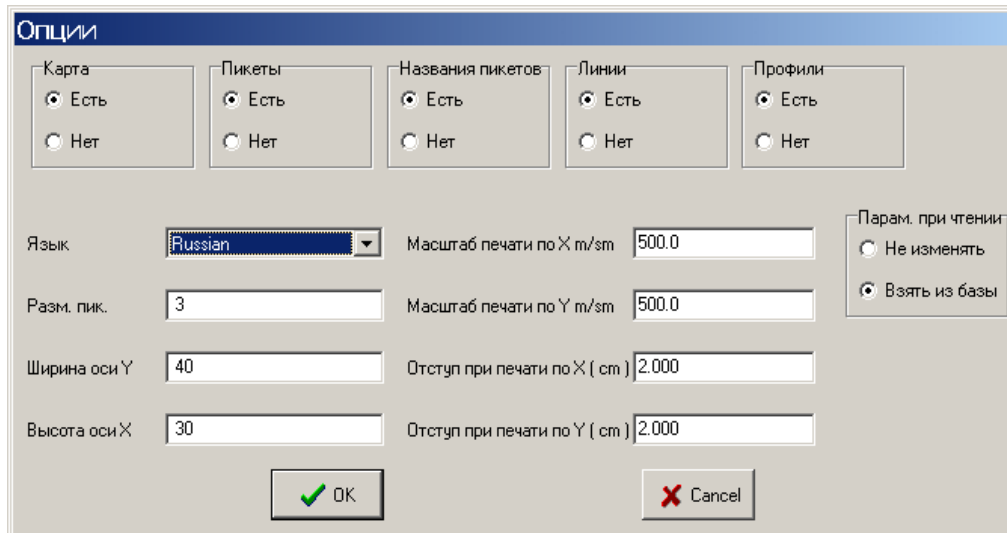


Рис.2.17. Опции

### 2.3.2.8 Работа со шкалой цветов.

Цвета для отрисовки областей площади (профиля) выбираются в соответствии с текущей шкалой цветов. Система высчитывает значение в каждой области площади (профиля), и в зависимости от значений шкалы цветов выбирает цвет для изображения данной области.

Количество значений шкалы цветов, значения и цвета являются произвольными, и информация о них сохраняется в базе данных Системы.

#### 2.3.2.8.1 Редактировать шкалу цветов.

При вызове этой процедуры можно изменить значения и цвета в текущей шкале цветов. Для этого выберите значение шкалы из предлагаемого списка и нажмите «ОК».

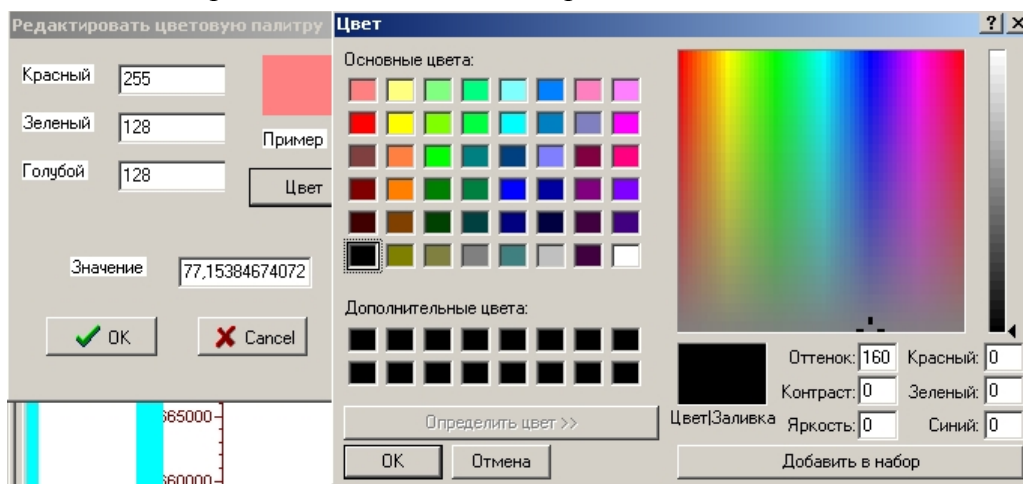


Рис.2.18. Цвет

В появившемся окне можно составить свой цвет изменив значения красной, зеленой и синей составляющих цвета. Справа выводится получившийся цвет. Ниже черты выводится верхнее значение для данного цвета. Если изменить цвет или значение и нажмете «ОК», то изменится и соответствующие значения в шкале цветов.

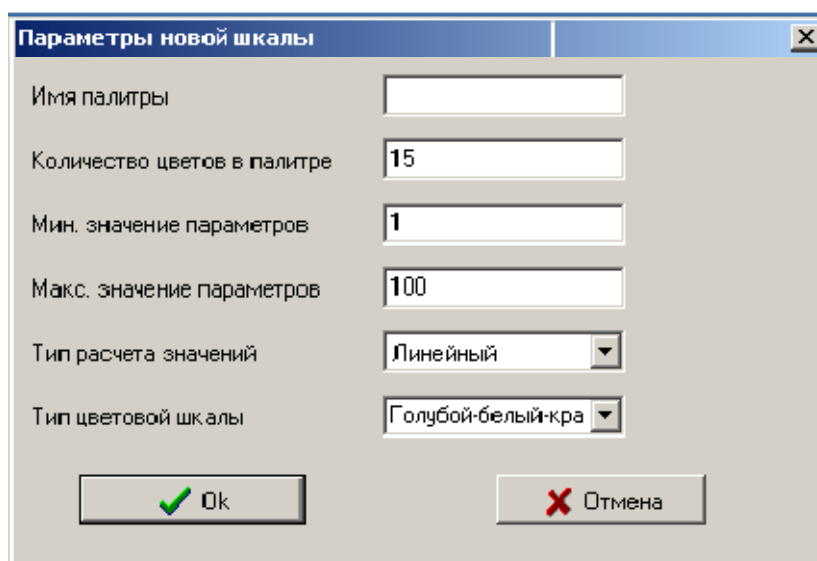
Возможно выбрать цвет из уже введенных в Систему оттенков, для этого нажмите на клавишу Цвет. Перед Вами откроется окно «Цвет». По нажатии клавиши ОК, окно «Цвет» закроется, а цвет отображенный над надписью цвет/заливка войдет в цветовую палитру. Окно «Цвет» содержит основную палитру и дополнительные цвета. Цвета в дополнительном наборе можно изменять используя мышь и редактируя значения в правой части окна. Выбранный цвет отражается над надписью Цвет/Заливка.

Вызвать редактирование цвета текущей шкалы цветов, возможно два раза нажав кнопку мыши на соответствующем цвете в шкале цветов.

#### 2.3.2.8.2 Изменить границы шкалы цветов

Чтобы изменить все границы шкалы цветов, воспользуйтесь меню Файл – Изменить границы шкалы цветов. Установите флажок «Как менять» и введите значение, после этого нажмите кнопку ОК. При выборе флажка «Домножить» все значения шкалы домножатся на введенное значение. При выборе флажка «Прибавить» ко всем значениям шкалы прибавится введенное значение.

#### 2.3.2.8.3 Новая шкала цветов.



Параметры новой шкалы

Имя палитры	<input type="text"/>
Количество цветов в палитре	<input type="text" value="15"/>
Мин. значение параметров	<input type="text" value="1"/>
Макс. значение параметров	<input type="text" value="100"/>
Тип расчета значений	<input type="text" value="Линейный"/>
Тип цветовой шкалы	<input type="text" value="Голубой-белый-кра"/>

Рис.2.19. Завести новую шкалу

Процедура создает новую шкалу цветов. После предложения Системы введите название новой шкалы цветов, количество цветов в шкале (его нельзя менять в дальнейшем), а также некоторые параметры для начального создания шкалы - минимальное и максимальное значения, способ расчета интервалов между значениями (линейный или логарифмический) и первоначальную градацию цветов (от красного к голубому или наоборот, или от красного к белому а потом к голубому). Новая шкала цветов станет текущей.

#### 2.3.2.8.4 Открыть шкалу цветов.

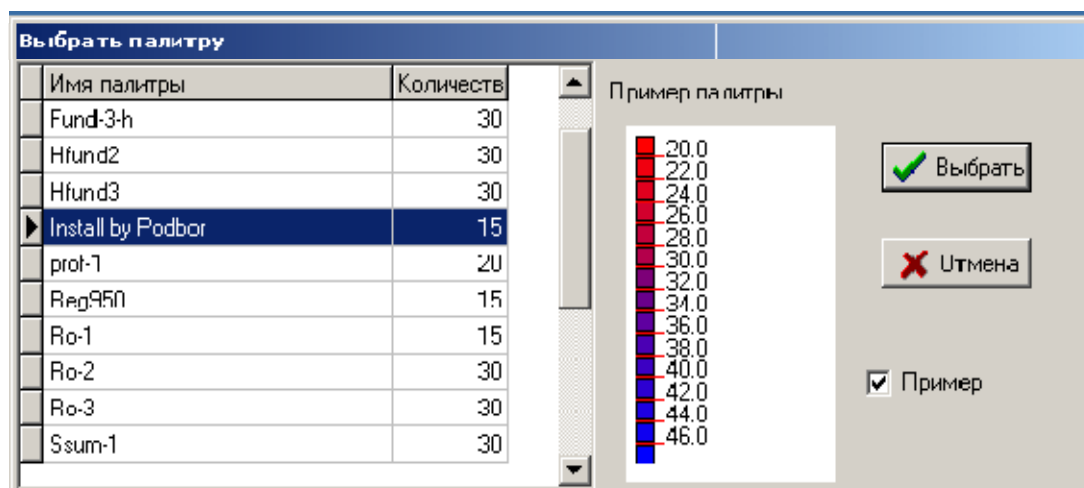


Рис.2.20. Выбрать палитру

При вызове этой процедуры можно выбрать текущую шкалу цветов из списка ранее введенных шкал цветов. Выводить или нет цвета палитры в окне открытия шкалы цветов, зависит от установки флага Пример.

#### 2.3.2.8.5 Сохранить шкалу цветов

Файл - Сохранить шкалу цветов. При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущей шкале цветов в базе данных Системы. Система заново запишет список цветов и значений в базу данных Системы.

#### 2.3.2.8.6 Сохранить шкалу цветов как

Файл - Сохранить шкалу цветов как. При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущей шкале цветов в базе данных Системы под другим именем. Система запишет список цветов и значений в базу данных Системы под новым именем.

#### 2.3.2.8.7 Удалить шкалу цветов

Файл - Удалить шкалу цветов. При вызове этой процедуры можно удалить шкалу цветов из базы данных Системы. Для этого нужно выбрать удаляемую шкалу цветов из предлагаемого списка шкал уже введенных в Систему.

### 2.3.3 Окно профильной визуализации

Окно служит для представления и редактирования результатов проведения профильных работ.

Здесь возможно объединение некоторых файлов в профиль (под произвольным именем) для совместного представления информации о пикетах в системе. Система записывает названия файлов, координаты пикетов и название профиля в свою базу данных. В дальнейшем можно оперировать с профилем, как с единым целым. Способ представления информации по профилю зависит от используемой трансформации и настройки вида профиля.

Система считывает информацию из файлов пикетов, включенных в данный профиль. В качестве координат пикетов используются координаты X и Y записанные в

соответствующих файлах пикетов. Всегда можно объединить информацию об обработанных пикетах в новый профиль или добавить (удалить) пикеты в уже существующий профиль. Пикеты сортируются в порядке указанном в окне упорядочивания пикетов. Координата первого пикета задается в окне упорядочивания пикетов. Расстояние между пикетами высчитывается как:

$$R = \sqrt{(X1 - X2)^2 + (Y1 - Y2)^2} ,$$

где R - расстояние между пикетами, X1 - X координата 1- го пикета ( из файла ), X2 - X координата 2- го пикета ( из файла ), Y1 - Y координата 1- го пикета ( из файла ), Y2 - Y координата 2- го пикета ( из файла ).

Можно выбрать трансформацию из списка предлагаемых системой трансформаций, вызвать процедуры послойной интерпретации результатов.

### 2.3.3.1 Построение профиля.

Построение профиля делится на три этапа

1) Вычисляются координаты интерполяционных точек. Размер выводимого профиля и количество вычисляемых интерполяционных точек задаются в настройках. Например, если по оси X количество вычисляемых точек 100 и размер 400, то это будет означать, что сама картинка будет занимать на экране (и в графических растровых файлах) 400 пиксель, а минимальный элемент изображения будет прямоугольник со стороной по  $X_s = 400/100 = 4$  пикселям. Далее вычисляются координаты центра каждого элемента изображения:

$$X_m = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{K_x} * m ,$$

где  $X_{\max}$  –максимальное значение X на профиле,  $X_{\min}$  –минимальное значение X на профиле,  $K_x$  – количество вычисляемых точек по оси X, m – номер вычисляемой точки. Чем меньше будет  $X_s$ , тем качественнее будет изображение картинки и тем дольше она будет рассчитываться (не стоит делать это число меньше 1).

2) Определить ближайший пикет к интерполяционной точке. Определить значение трансформации в пикете на глубине, соответствующей глубине интерполяционной точки. Присвоить это значение интерполяционной точке.

3) Просматривается значение цветовой шкалы и точке присваивается соответствующий цвет. Далее выводится прямоугольник на экран с центром соответствующим  $X_m$ , стороной  $X_s$  и соответствующим цветом.

Хочется сразу отметить, что перед разработчиками стояла задача, создать оперативную процедуру построения профиля данных электроразведки. Пакет, даже достаточно сложный, но рассчитанный исключительно на нужды электроразведки, не может конкурировать со сложными системами построения карт, например SURFER. И вышеописанная процедура достаточным образом справляется с оперативным построением карт, а при необходимости окончательный вариант для сдачи обработанного материала можно вывести любой системой построения карт.

### 2.3.3.2 Представление данных.

В левой части окна выводится шкала цветов (цвет и соответствующие границам значения). Слева и сверху от изображения профиля выводятся координаты пикетов профиля. Внизу окна выводится Название текущего профиля, название трансформации, и минимальное, максимальное значения на профиле.

### 2.3.3.3 Трансформации используемые для представления профиля.

Уже введенные в Систему трансформации :

- 1) Построения результатов сопротивлений послойной интерпретации в зависимости от глубины (м).
- 2) RoTau от Н эффективного.
- 3) SEff – S эффективное от Н эффективного.
- 4) STau – STau от HTau.

### 2.3.3.4 Настройка вида профиля.

В зависимости от этих настроек выбираются различные способы интерполяции значений в точках между пикетами. Значение Y дневной поверхности пикета берется из файла.

Рис.2.21. Вид профиля

В левом нижнем углу вводится размер вычисляемой картинке профиля (в пикселях) и количество вычисляемых интерполяционных точек. Например, если по оси X введены значения Кол. выч. точек 100 и размер 400, то это будет означать, что сама картинка будет занимать на экране (и в графических растровых файлах) 400 пикселей, а минимальный элемент изображения будет прямоугольник со стороной по X =  $400/100 = 4$  пикселей. Чем меньше будет это число, тем качественнее будет изображение картинке, и тем дольше она будет рассчитываться (не стоит делать это число меньше 1).

Можно ввести верхнюю и нижнюю границу значений в точках. Если значение пикета выходит за эти рамки, то его значение автоматически приравнивается верхнему (нижнему) краю разрешенных значений. Можно ввести верхнюю и нижнюю границу по глубине визуализируемого профиля. Если значения глубины выходят за эти рамки, то они автоматически приравниваются верхнему (нижнему) краю разрешенных значений. Значения по глубине задаются по оси Y направленной вниз или вверх, в зависимости от значения флага "Направление оси глубин".

Можно определить:

- 1) Выводить или нет цветное представление профиля.
- 2) Выводить или нет линии уровней глубины.
- 3) Выводить или нет подписи значений в слоях.
- 4) Выводить или нет границы слоев.
- 5) Направление оси глубин вверх (вниз).

### **2.3.3.5 Редактирование профиля.**

#### **2.3.3.5.1 Добавить пикет в профиль.**

При вызове этой процедуры возможно добавление новых пикетов из файлов. Для этого нужно выбрать имена файлов (если файлов больше 1, то их можно выбирать нажимая Shift и стрелки, или перечисляя через пробел и выделяя названия кавычками). Все файлы должны соблюдать Формат файла данных системы Подбор. После считывания файлов Система добавит информацию о новых пикетах в текущий профиль.

#### **2.3.3.5.2 Удалить пикет.**

При вызове этой процедуры можно удалить пикеты из текущего профиля. Для этого помечаются пикеты для удаления в предлагаемом списке. Помеченные пикеты выделяются в первой колонке галочкой. Пикеты можно пометить или через меню, или два раза кликнув мышкой в первой колонке. Возможно пометить сразу все файлы через меню Пометить-Пометить все пикеты. Все помеченные пикеты будут удалены из профиля после нажатия клавиши «Удалить».

#### **2.3.3.5.3 Новый профиль.**

При вызове этой процедуры можно создать новый профиль. После предложения Системы введите название нового профиля. Новый профиль станет текущим профилем. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе профилями, и таблица пикетов входящих в каждый профиль.

### **2.3.3.6 Открыть профиль.**

При вызове этой процедуры можно выбрать текущий профиль из списка ранее введенных профилей. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе профилями, и таблица пикетов входящих в каждый профиль.

#### **2.3.3.6.1 Сохранить профиль.**

При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущем профиле в базе данных Системы. Система заново запишет список пикетов в базу данных Системы, а также Среду по умолчанию.

#### **2.3.3.6.2 Сохранить профиль как.**

При вызове этой процедуры можно сохранить всю информацию о текущем профиле в базе данных Системы под другим именем. Система запишет список пикетов в базу данных Системы под новым именем, а также Среду по умолчанию. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе профилями, и таблица пикетов входящих в каждый профиль.

#### **2.3.3.6.3 Удалить профиль.**

При вызове этой процедуры можно удалить профиль из базы данных Системы. Для этого нужно выбрать удаляемый профиль из предлагаемого списка профилей уже введенных в Систему. Удалится вся информация о профиле – Список пикетов, Среда по умолчанию. В качестве справочной информации выводится таблица со всеми существующими в базе профилями, и таблица пикетов входящих в каждый профиль.

#### **2.3.3.6.4 Изменить порядок пикетов.**

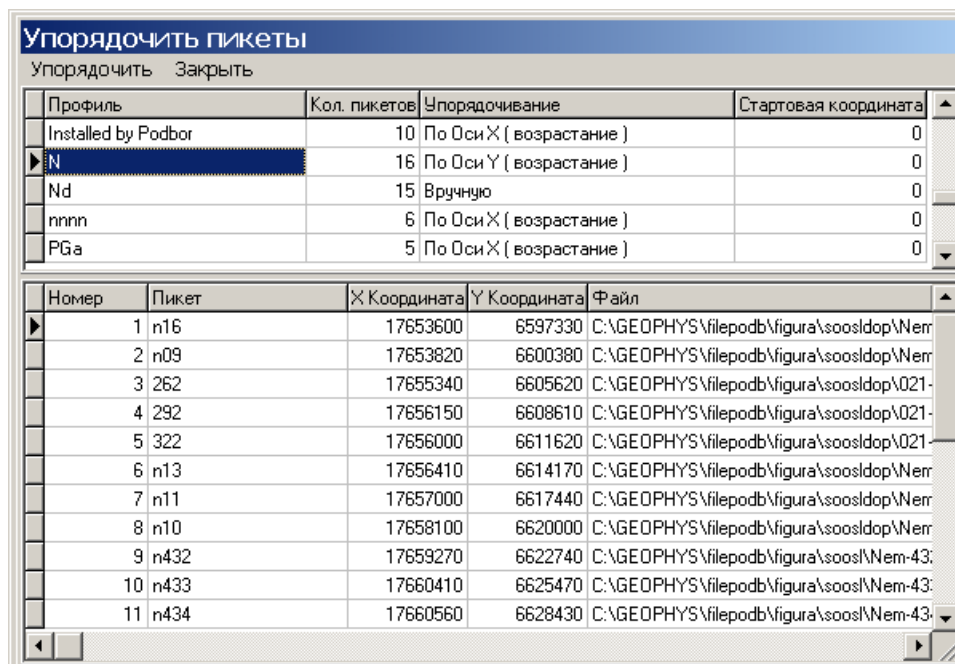


Рис.2.22. Упорядочивание пикетов

Окно упорядочивания пикетов служит для задания порядка вывода пикетов в профиле и задания координаты первого пикета в профиле. Верхняя таблица содержит названия профилей, количество пикетов в профиле, способ упорядочивания и координату стартовой точки. Нижняя таблица содержит список пикетов входящих в выбранный профиль и их порядковые номера в профиле.

Упорядочить файлы можно по возрастанию (убыванию) координаты X, по возрастанию (убыванию) координаты Y, по возрастанию (убыванию) имени файла - используйте соответствующий пункт меню. Возможно ввести порядок файлов вручную. Последний из примененных способов упорядочения отображается в столбце «способ упорядочения» профиля. Для упорядочивания файлов вручную достаточно просто ввести порядковые номера в 1-ый столбец таблицы пикетов. В таблице профилей, в столбце стартовая координата выводится координата первого пикета. Далее введенный порядок пикетов будет использоваться во всех представлениях профиля.

### 2.3.3.7 Дополнительные возможности окна профильной отрисовки.

1) Сохранить изображение. При вызове этой процедуры можно записать изображение профиля в графический файл.

2) Сохранить изображение с альтернативным расположением осей. Например ось X расположена внизу картинки.

3) Создать файл формата Word с подготовленным для печати профилем и цветовой шкалой. Масштаб и отступы от краев листа, задаются в опциях. Файл создается на основе шаблона содержащегося в файле \template\etpro.doc. Можно изменить шаблон по своему усмотрению. При выводе в Word необходимо помнить, что этот редактор не обеспечивает высокую точность масштабирования, не лучше 0.2 %, и не позволяет печатать большие профили.

4) Создать файл для других систем. При вызове этой процедуры можно записать файл в формате других систем построения карт ( Surfer, Geo Soft ).

5) Создать файл для других систем с дополнительными точками. При вызове этой процедуры можно записать файл в формате других систем построения карт. При обычном



создании файлов для других систем, в файл записывается координата пикета по профилю, глубина верхней границы слоя и значение параметра на верхней границе. При отрисовке по такой информации изображений профиля другими системами, глубины неизбежно искажаются. Поэтому был предложен вариант вывода дополнительных значений внутри слоев. При этом выводе в каждый слой вводятся дополнительные значения, максимально приближенные к верхней и нижней границам слоя по глубине и значениями параметра равному параметру слоя.

6) Копия экрана.

7) Среда по умолчанию. Можно ввести любую среду и привязать ее к профилю. При обработке пикетов, во время подбора среды, среду по умолчанию можно будет использовать как стартовую.

### 2.3.3.8 Опции окна профильной отрисовки.

Опции	
Разм. пик.	4
Тол.гран.	1
Дл.гран.	10
Тол.уров.	1
Макс.знач.под.	1.000E+35
Масштаб печати по X м/см	100.0
Масштаб печати по Y м/см	100.0
Отступ при печати по X ( см )	2.000
Отступ при печати по Y ( см )	2.000

Рис.2.23. Опции для профильной визуализации

Через меню Настройка - Опции пользователь попадает в окно настройки Окна.

1) Можно задать размер изображения пикетов.

2) Толщину выводимых границ между слоями.

3) Длину выводимых границ между слоями.

4) Толщину линий выводимых уровней.

5) Максимум выводимых на экран подписей для значений величин. Этот параметр удобно применять, если значения в пикетах уже слишком велики. Это бывает, например, если при послойной интерпретации если слой непроводящий то значение может быть даже  $10^{100}$  (Ом\*м). В этом случае удобней вообще не проставлять значения, чем ставить бессмысленно большие значения.

Параметры вывода в Word

6) Масштаб печати по X при выводе в Word

7) Масштаб печати по Y при выводе в Word

8) Отступ при печати по X ( см ) при выводе в Word

9) Отступ при печати по Y ( см ) при выводе в Word

Возможно пользуясь меню Настройка - Цвета, Шрифты - задавать цвета и шрифты соответствующих надписям элементов.

### 2.3.3.9 Окно профильной отрисовки “Линии”.

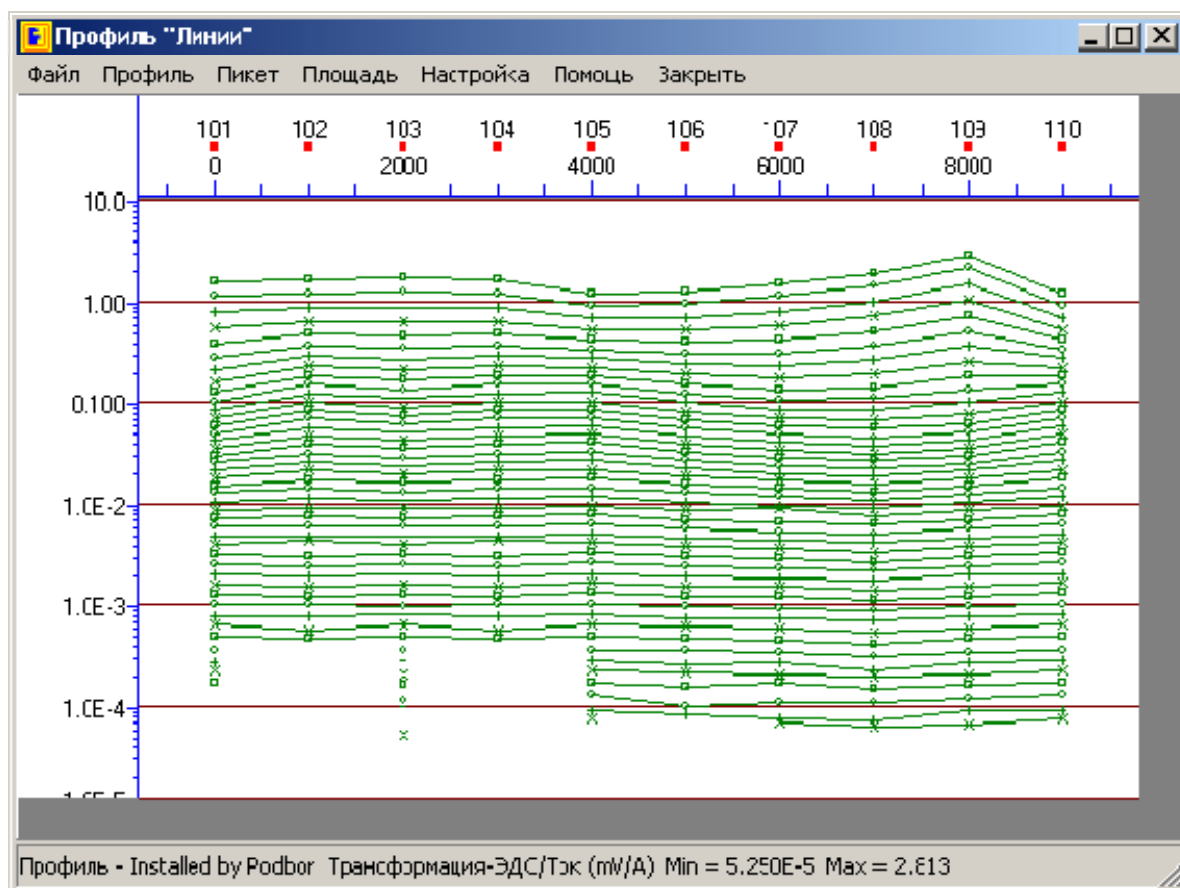


Рис.2.24.

Окно (рис.2.24) служит для представления и редактирования результатов проведения профильных работ. От Окна профильной отрисовки это окно отличается представлением информации по профилю. Список профилей является общим для окон профильной отрисовки и профильной отрисовки линий. Поэтому все операции с профилями являются общими для этих двух окон.

#### 2.3.3.9.1 Представление данных

Слева выводится шкала значений трансформанты. На графиках трансформант – по оси X откладывается координата пикета, по оси Y значения трансформант. Все значения трансформант соответствующие одному времени соединяются между собой линиями. Внизу окна выводится Название текущего профиля, название трансформации, и минимальное (максимальное) значения на профиле.

#### 2.3.3.9.2 Трансформации используемые для представления профиля “Линии”

Уже введенные в Систему трансформации :

- 1) ЭДС / ТОК (mV/A).
- 2) RoTau.

### 2.3.3.9.3 Настройка вида профиля “Линии”

Вид профиля

Оставлять каждую ... точку  
1

Линейная часть оси Y  
1.000E-5

Линии уровней  
☒ Есть  
☐ Нет

Ok Отмена

Размер рис.(пик.)

Ось X 500

Ось Y 300

Миним. знач. 1.000E-5

Время минимум 1.000E-4

Максим. знач. 100.0

Время максимум 400.0

Рис.2.25

В левом нижнем углу (рис.2.25) вводится размер изображения профиля (в пикселях). Например, если по оси X введены значения для размера 400, то это будет означать, что сама картинка будет занимать на экране (и в графических растровых файлах) 400 пикселей.

Можно ввести верхнюю и нижнюю границу значений в точках. Если значение трансформанты выходит за эти рамки, то точки соответствующие этим значениям не будут визуализированы на профиле. Можно ввести верхнюю и нижнюю границу по времени, если существуют значения трансформант для времен меньше минимального и больше максимального, то они не будут отрисовываться на профиле.

Возможно выводить не каждое значение трансформант, а через одно или через 2. В результате получится на экране в 2 или в 3 раза меньше точек. При вводе 1 остаются все точки для вывода. При вводе 2-ки выводится только каждая вторая точка. При вводе 3-ки выводится каждая третья точка и т.д. Это может быть удобно, когда линии выводятся очень плотно и трудно разобрать, как именно изменяется значение по профилю в тот или иной момент времени.

Возможно задать линейный интервал для оси Y. Это позволяет растянуть или сжать по оси Y изображения трансформант на профиле. По оси Y выводится гиперболический арксинус значений. Можно ввести размер его линейной части.

Можно задать:

- 1) Выводить или нет линии уровней значений.

### 2.3.3.9.4 Дополнительные возможности окна профильной отрисовки “Линии”.

Возможности в основном соответствуют возможностям окна профильной отрисовки.

- 1) Сохранить изображение. При вызове этой процедуры Можно записать изображение профиля в графический файл.

- 2) Сохранить изображение с альтернативным расположением осей. Например ось X расположена внизу картинки.

3) Создать файл формата Word с подготовленным для печати профилем. Масштаб и отступы от краев листа, задаются в опциях. Файл создается на основе шаблона, содержащегося в файле \template\etprli.doc.

4) Создать файл для других систем. При вызове этой процедуры можно записать файл в формате других систем построения карт (Surfer, Geo Soft ).

5) Копия экрана.

### 2.3.3.9.5 Редактирование профиля

Редактирование профиля полностью совпадает с редактированием профиля в окне профильной отрисовки.

### 2.3.3.9.6 Опции окна профильной визуализации «Линии»

The image shows a Windows-style dialog box titled "ОПЦИИ". It contains a list of settings for profile visualization. The settings are as follows:

Parameter	Value
Разм. пик.	4
Тол. линий	1
Размер точки	5
Тол. уров.	1
Масштаб печати по X, m/sm	1000
Высота профиля в см	10.00
Отступ при печати по X (см)	2.000
Отступ при печати по Y (см)	2.000

On the right side of the dialog, there are two buttons: "Ok" (with a green checkmark icon) and "Отмена" (with a red X icon).

Рис.2.26. Опции для профильной визуализации «Линии»

Профильная отрисовка линий имеет такие же опции, как и окно профильной визуализации (рис.2.26). Нет только максимума выводимых на экран подписей.

### 2.3.4 Обработка пикетов площади

Для начала обработки пикета достаточно два раза кликнуть мышкой по изображению интересующего пикета или через меню Выбрать - Пикет - Обработать пикет. При вызове этой процедуры Можно выбрать пикет (из входящих в площадь) для дополнительной обработки. Для этого из предлагаемой таблицы (таблица содержит краткую информацию о пикетах - наименование, координаты, название файлов) выберите интересующий пикет и нажмите кнопку «Об.Пик.». Окна, которые будут вызваны возможно настроить через меню Пикет - Опции работы с пикетом.

В настройках программы есть пункт – опции работы с пикетом. Вызывая, эту процедуру, можно задать список окон, которые открываются при обработке пикета. Список окон обработки пикета :

1 Окно Среды.

2 Окно ЭДС

- 3 Окно Сопровитлений
- 4 Окно STau
- 5 Окно Разностей
- 6 Окно Установки и Тока.
- 7 Окно Импульса.
- 8 Окно Дополнительной информации.
- 9 Окно Объектов.

#### 2.3.4.1 Расчет прямой задачи.

В системе Подбор используется следующая основная вычислительная процедура - прямая задача MAG. Процедура написана на основе алгоритма, полученного методом пространственных гармоник, предложенным А.Н.Тихоновым и развитым нами на случай многослойных сред.

По окончанию счета (запускается через меню – Счет – Счет прямой задачи или клавиша F9) на экране рядом с полевой кривой появляется теоретическая кривая, рассчитывается кривая разностей, высвечивается значение сигмы - среднеквадратичного отклонения.

$$\sigma = 100 * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \frac{(ET_i - EP_i)^2}{Asd}}{N}}$$

где  $Asd = \frac{(EP_i EP_{i-1} + EP_i + EP_{i+1})}{3}$ , N - количество непомеченных точек на

кривой, ET – теоретическая ЭДС, EP - полевая ЭДС.

Можно пометить участки или отдельные точки на полевой кривой, и они не будут учтены при расчете  $\sigma$ . Система может выдать сообщение, что у нее нет параметров такой установки. В этом случае можно или отказаться от счета и выбрать из списка установок близкую по параметрам установку, или продолжить счет и тогда через некоторое время параметры будут насчитаны и помещены в файл Ustan.eta и в список установок. Если произошел случайный запуск расчета, то можно прервать счет.

После расчета процедуры прямой задачи появится еще один график - график отклонения теоретической ЭДС от полевой в процентах – «Окно разностей»:

$$RAZ_i = \frac{100 * (EP_i - ET_i)}{EP_i}$$

На этом графике отмечается условный 'интервал доверия'. Предполагается, что если кривая отклонения находится внутри интервала, то Ваша среда подобрана хорошо. Этот график будет полезен на поздних стадиях интерпретации. Разумная ширина интервала должна отражать два обстоятельства. Во-первых, какого минимального уровня расхождения полевой и теоретической кривых ( $\sigma$ ) мы собираемся достигать в процессе инверсии. Во-вторых, каков уровень точности полевого материала. Под этим мы подразумеваем величину тех составляющих погрешности измерений, которые нарушают 'гладкость', маскируют истинную форму полевых кривых и которые формально можно трактовать как следствия нарушения линейности измерительного тракта. Нужно заметить, что повторяемость результатов повторных измерений не может служить доказательством отсутствия обсуждаемых типов погрешностей.

При поставке Системы ширина интервала определена в 1%. На экране цветного монитора этот интервал дан другим цветом. Такой интервал удобен при работе с полевым материалом хорошего качества, а также при экспериментах с псевдополевыми кривыми.

#### **2.3.4.2 Расчет прямой задачи с учетом неоднородностей.**

Процедура MAG3D обеспечивает оперативный расчет устанавливающегося поля в горизонтально-неоднородных средах для методов ЗСБ, МПП, КМПП. Процедура позволяет быстро, возможно, в полевых условиях, провести анализ неудовлетворительных результатов одномерной интерпретации с целью выявления локальных неоднородностей или быстрых изменений разреза по профилю.

Расчеты по программе MAG3D имеют приближенный характер. Алгоритм основан на замене геоэлектрической неоднородности вторичными сторонними источниками, распределение и изменение во времени которых контролируется нормальным полем (полем вмещающей слоистой среды). Подход основан на предположении о, в некотором смысле, слабом влиянии неоднородности (метод возмущений). Эта программа создавалась в рамках сложного компромисса между потребностями практической работы и имеющимися программными комплексами по численному 3D-моделированию, использование которых, как правило, возможно только с привлечением авторов и ограничено также ресурсами ЭВМ.

В Окне «Объекты» доступны для формирования и редактирования включения-объекты в том слое, который определен положением курсора в Окне «Среда». Всего в среде объектов может быть не более 5, значит в данном слое тоже не более 5, в зависимости от наличия объектов в других слоях. Объект в плане является сектором кольца и занимает по высоте всю толщину слоя. В плане рисуются объекты для текущего слоя. Запускается программа через меню – Счет – Расчет неоднородностей или клавиша Shift-Ctrl-F9.

#### **2.3.4.3 Расчет обратных задач.**

Целью процедур инверсии является уменьшение значения среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ , т. е. найти среду, при которой значение  $\sigma$  наименьшее. В качестве возможных сред рассматриваются среды, находящиеся в некой окрестности параметров первоначального приближения среды. При расчете  $\sigma$  учитываются только непомеченные точки кривой ЭДС. Если нужно исключить из рассмотрения процедуры инверсии какие-либо точки, то пометьте их, и Система не будет их учитывать в работе процедур инверсии. Перед первым запуском процедур инверсии пометьте явные 'отскоки' и 'шумливые' точки. Теперь в процедурах инверсии они не будут учитываться при расчетах и исключится их влияние на определение параметров среды. На заключительной стадии процесса инверсии возможно обнаружатся еще 'шумливые' точки с помощью графика отклонения теоретической ЭДС от полевой. Для хорошей работы обратных задач нужно будет пометить и эти точки.

Процедуры инверсии варьируют только незакрепленные параметры среды, которые пользователь отмечает, пометкой параметров.

В состав Системы входит 4 процедуры инверсии: NEWTON (Shift-F10), LEMA (Ctrl-F10), AUTO2 (Ctrl-Shift-F10), AUTO1 (F10). Первые две процедуры выдают после первого запуска, как правило, наилучший вариант, при повторном запуске они обычно уже ничего не меняют. Исключение составляют случаи, когда процедура перестает считать из-за:

- 1) исчерпывания ресурса итераций;
- 2) изменения какого-то параметра более чем в 10 раз.

Второй случай маловероятен, но может иметь место, не исключено, что этот параметр может оказаться невлиятельным - тогда закрепите его.

Процедуры AUTO1,2 выдают результат после каждой итерации, повторный запуск необходим. Процедуры AUTO могут даже немного ухудшить среду, увеличив  $\sigma$ , но, скорее всего, при дальнейших итерациях они улучшат среду.

Процедуры AUTO и NEWTON вычисляют производные по параметрам среды, используя аналитические формулы. Использование аналитических формул позволяет вычислять производные с такой же точностью, с какой вычисляются прямые задачи (это существенное отличие от численного вычисления производных).

В процедуре LEMA вычисляются производные численно. В процедурах LEMA, NEWTON, AUTO2 используются градиентные методы поиска среда. В процедуре AUTO1 ищется среда, с помощью перебора всех возможных вариантов разрезов в некоторой окрестности первоначального приближения.

Для каждого конкретного случая нужно выбирать свой порядок использования процедур инверсии. Для каждого типа разреза возможен свой наиболее оптимальный порядок запуска процедур инверсии. Весьма условно можно рекомендовать для начального запуска процедуры NEWTON и LEMA, а для уточнения - процедуру AUTO1 и если она не работает, то AUTO2. При запуске процедуры перебора AUTO1 не рекомендуется помечать больше 4-ех параметров из-за резкого увеличения времени счета.

До какого значения  $\sigma$  производить варьирование параметров, нужно определить самостоятельно, но из нашего опыта следует, что теоретические кривые можно подбирать с точностью до долей процента, а полевые - при хорошем качестве первичного материала - до уровня 1-2 %.

### **2.3.5 Работа с файлами**

#### **2.3.5.1 Сохранение всей информации о пикете в файл Подбора**

Вызов этой процедуры особенно актуален для записи Среда в файл. При вызове этой процедуры можно записать информацию в текущий файл. После выполнения данной процедуры файл будет содержать среду в соответствии с Форматом файла данных системы Подбор. Вызывается через меню Файл – Сохранить файл данных или клавишей F2.

#### **2.3.5.2 Ввод данных о новом пикете ( из файла данных ).**

При вызове этой процедуры можно считать информацию о новом пикете из файла. Для этого нужно должны выбрать имя файла. В вызываемом файле данных содержатся сведения о пикете и применяемой установке, кривая ЭДС и, возможно, параметры среды, если их нет, то в зависимости от установок или останутся старые или будет загружена среда по умолчанию. Файлы данных подготавливаются заранее в Системе или любом текстовом редакторе. При вводе кривая ЭДС трансформируется в кривые RoTau и STau. Все файлы должны соблюдать Формат файла данных системы Подбор. Вызывается через меню Файл – Открыть файл данных или клавишей F3.

#### **2.3.5.3 Ввод данных о новом пикете ( из файла данных ) со сглаживанием.**

При вызове этой процедуры можно считать информацию о новом пикете из файла. Для этого нужно выбрать имя файла. В вызываемом файле данных содержатся сведения о пикете и применяемой установке, кривая ЭДС и, возможно, параметры среды, если их нет, то останутся старые. Файлы данных подготавливаются заранее в Системе или любом текстовом редакторе. При вводе кривая ЭДС трансформируется в кривые RoTau и STau. Все файлы должны соблюдать Формат файла данных системы Подбор. В отличие от ввода данных о новом пикете без сглаживания, данная процедура предварительно сглаживает кривую ЭДС. Вызывается через меню Файл – Открыть файл данных или клавишами Ctrl-Shift-F3.

#### **2.3.5.4 Открыть второй файл данных.**

При вызове этой процедуры можно считать информацию об ЭДС из нового файла. Заметьте, что считывается только информация об ЭДС и помещается вместо теоретической кривой. Эта процедура служит для сравнения двух файлов. Информация о среде, установке, временах измерения остается от основного файла.

Для вызова 2-ой кривой ЭДС нужно выбрать имя файла. Файлы данных подготавливаются заранее в Системе или любом текстовом редакторе. При вводе кривая ЭДС трансформируется в кривую RoTau. Все файлы должны соблюдать Формат файла данных системы Подбор. Вызывается через меню Файл – Открыть файл данных или клавишей F4.

#### **2.3.5.5 Сохранить рассчитанную кривую в файл формата Подбор.**

При вызове этой процедуры происходит создание нового файла данных, в котором, вместо полевой кривой, записана насчитанная теоретическая кривая. Все остальные данные соответствуют тем, что используются при счете. Процедура работает только при наличии результатов счета. Для создания нового файла нужно выбрать директорию и набрать имя файла. Новый файл будет создан в соответствии с Форматом файла данных Системы Подбор. Вызывается через меню Файл – Создать файл данных с расчетной ЭДС или клавишей F8.

#### **2.3.5.6 Записать результаты расчетов в файл.**

Документирование выводом в файл законченной работы по пикету. Выводятся полевая и подобранная кривые ЭДС, относительные отклонения, подобранная среда и данные о пикете (аккуратно и удобно скомпонованные результаты, готовые для любых видов отчета). Процедура работает только при наличии результатов счета. Созданный файл будет в кодах ASCII (DOS), и в дальнейшем может быть вызван в любой редактор. Для создания нового файла Нужно выбрать директорию и набрать имя файла. Вызывается через меню Файл – Создать файл результатов счета или клавишей F5.

#### **2.3.5.7 Записать результаты RoTau в файл.**

Документирование выводом в файл законченной работы по пикету. Выводятся полевая и подобранная кривые кажущегося сопротивления, относительные отклонения, подобранная среда и данные о пикете (аккуратно и удобно скомпонованные результаты, готовые для любых видов отчета). Работает только при наличии результатов счета. Созданный файл будет в кодах ASCII (DOS), и в дальнейшем может быть вызван в любой редактор. Для создания нового файла Нужно выбрать директорию и набрать имя файла. Вызывается через меню Файл – Создать файл результатов счета RoTau или клавишами Ctrl-Shift-F5.

#### **2.3.5.8 Записать результаты STau в файл.**

Документирование выводом в файл законченной работы по пикету. Выводятся полевая и подобранная кривые STau и HTau, относительные отклонения, подобранная среда и данные о пикете (аккуратно и удобно скомпонованные результаты, готовые для любых видов отчета). Работает только при наличии результатов счета. Созданный файл будет в кодах ASCII (DOS), и в дальнейшем может быть вызван в любой редактор. Для создания нового файла Нужно выбрать директорию и набрать имя файла. Вызывается через меню Файл – Создать файл результатов счета STau.



### 2.3.5.9 Записать в графический формат изображение окна.

При вызове этой процедуры можно записать изображение окна в графический файл. Для этого необходимо выбрать директорию для записи файла, название файла и формат файла из предлагаемого списка. Вызывается через меню Файл – Сохранить рисунок или клавишами Ctrl-F5.

### 2.3.5.10 Изображение – Копия экрана.

При вызове этой процедуры можно записать копию экрана в графический файл. Для этого необходимо выбрать директорию для записи файла, название файла и формат файла из предлагаемого списка. Вызывается через меню Файл – Копия экрана.

## 2.3.6 Представление данных.

### 2.3.6.1 Окно Среды.

Участвующие в расчетах прямой задачи параметры среды вводятся в Окне среды (рис.2.27). В этом окне можно задавать параметры среды, участвующие в расчете теоретических кривых и проводить автоматическое уточнение разреза. Кроме того, на экране всегда присутствуют все необходимые данные о разрезе. При вызове окон работы с пикетами, считывается среда, записанная в соответствующем файле данных. Если в файле нет среды, то в зависимости от настроек в Опциях – кнопки Стартовая среда:

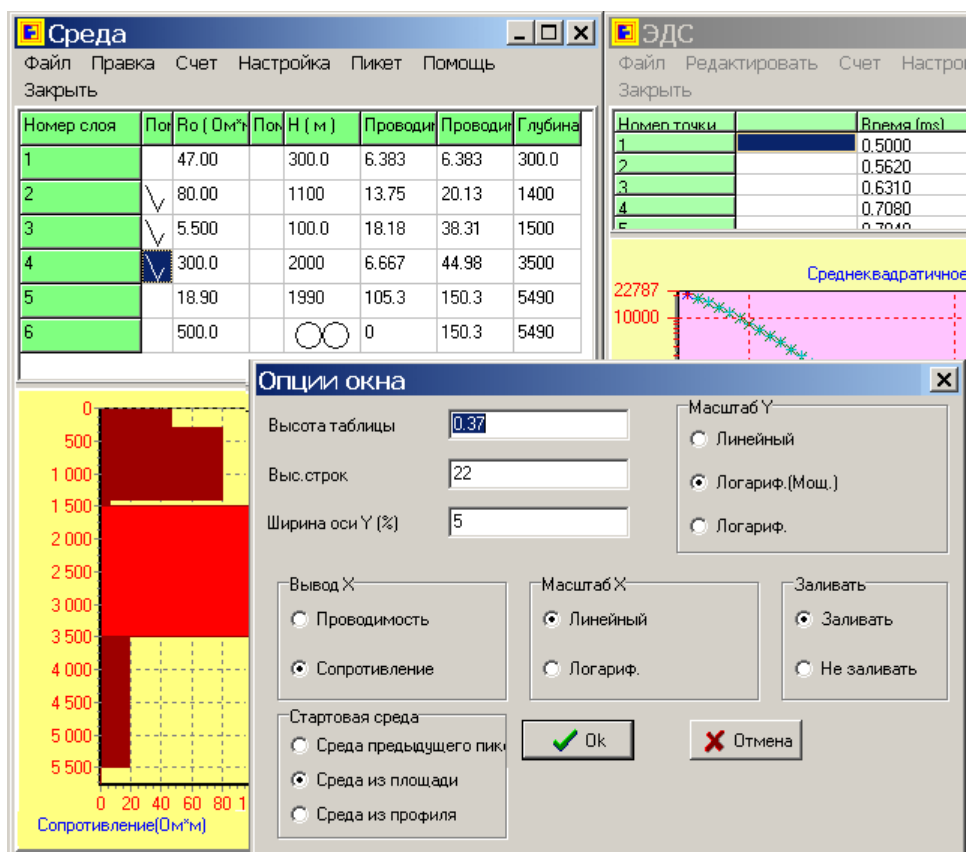


Рис.2.27. Окно среды

- 1) Остается ранее редактированная среда, предыдущего пикета.
- 2) Среда по умолчанию привязанная к текущей площади.

3) Среда по умолчанию привязанная к текущему профилю.

В 1-ом столбце задается номер слоя. Во 2-ом столбце ставится признак варьирования удельного сопротивления слоя. В 3-ем столбце вводится удельное сопротивление слоя (в Ом\*м). В 4-ом столбце ставится признак варьирования мощности слоя. В 5-ом столбце задается мощность слоя (в метрах). В 6-ом столбце показывается продольная проводимость слоя (в См). В 7-ом столбце показывается суммарная продольная проводимость толщи до подошвы слоя (в См). В 8-ом столбце показывается глубина подошвы слоя (в метрах).

Ниже численного представления среды выводится его графическое представление. Высоту графического представления возможно регулировать, сдвигая границу между таблицей и графиком с помощью мышки.

Через меню Настройка–Опции можно настроить вид окна. Опции окна позволяют настроить следующие параметры :

По оси X выводится в зависимости от настроек кнопок Вывод X :

а) удельная проводимость слоев (в  $\text{См}/\text{м}=1/(\text{Ом}\cdot\text{м})$ ).

б) удельное сопротивление слоев ( $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ).

Масштаб по оси X в зависимости от настроек :

а) логарифмический

б) линейный.

По оси Y выводится в зависимости от настроек :

а) Глубина от дневной поверхности в линейном масштабе

б) Глубина от дневной поверхности в логарифмическом масштабе

с) Логарифмы мощностей слоев ( в этом случае шкала не выводится ).

Графическое представление среды выводится в зависимости от настроек :

а) Заливается цветом, в этом случае текущий слой числового представления выделяется на графике другим цветом.

б) Выводятся только контуры слоев.

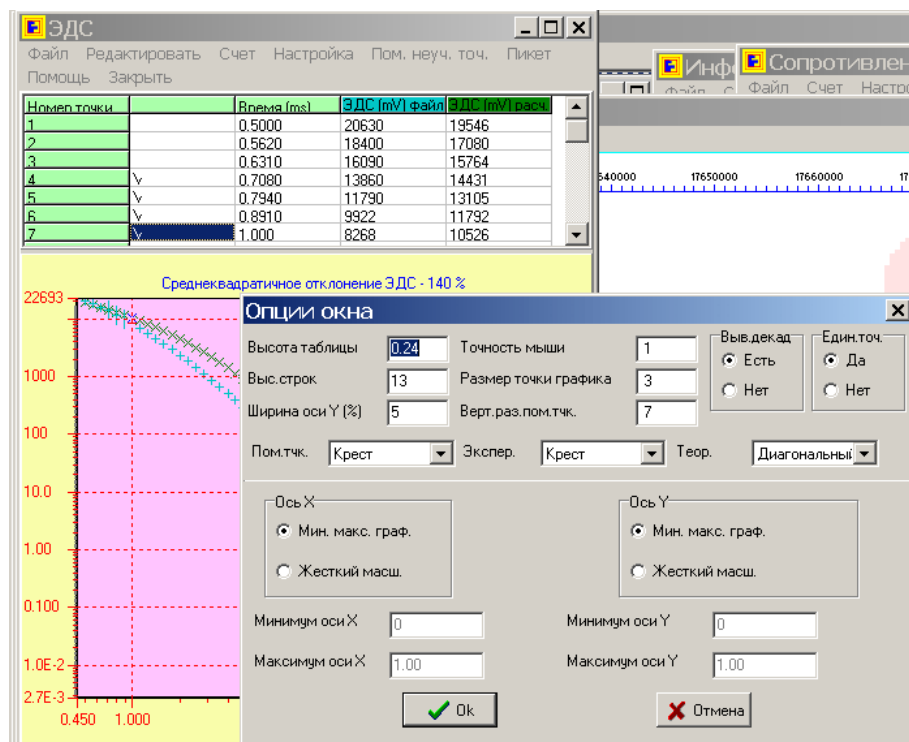


Рис.2.28. Окно ЭДС

### 2.3.6.2 Окно ЭДС.

Окно ЭДС служит для просмотра и сравнения кривых ЭДС - полевой и рассчитанной. При вызове окон работы с пикетами, считываются ЭДС, записанные в соответствующем файле данных.

В качестве нулевой точки по времени принимается нулевая точка в задании формы импульса.

Можно пометить точки на кривой ЭДС, которые в дальнейшем не будут учитываться при нахождении оптимальной среды, во время запуска обратных задач. Например, если подбирается верхняя часть разреза, то можно пометить точки на конце кривой, тогда эти точки не будут оказывать влияние на нахождение варьируемых параметров верхней части разреза.

После расчета теоретических кривых на экран высвечивается также значение сигмы- среднеквадратичного отклонения.

Перемещение по точкам возможно или клавишами курсоров или можно непосредственно выбрать точку на графике и щелкнуть по ней два раза мышкой.

Шкалы графиков логарифмические.

В 1-ом столбце выводится номер точки на кривой. Во 2-ом столбце ставится признак неучета точки кривой при расчете обратных задач. В 3-ем столбце вводится время измерения (в миллисекундах). В 4-ом столбце вводится ЭДС из файла (в милливольтках). В 5-ом столбце выводится ЭДС (в милливольтках), рассчитанное от заданной среды. Можно умножить все значения столбца полевой ЭДС или времени на некоторое значение, если наберете число в предпоследней строке соответствующего столбца, помеченной знаком "\*", или через меню - Редактировать-Умножить ЭДС (Умножить время). Можно прибавить ко всем значениям столбца полевой ЭДС или времени некоторое значение, если наберете число в последней строке соответствующего столбца, помеченной знаком "+", или через меню - Редактировать - Добавить ЭДС (Добавить время). Добавить точку можно через меню - Редактировать и Добавить точку или клавишами Shift-Ins. Удалить слой можно через меню - Редактировать и Удалить точку или клавишами Shift-Del.

Можно пометить любую точку на кривой и тогда она не будет учитываться при нахождении среднеквадратичного отклонения. Для того чтобы пометить (распометить) точку во втором столбце два раза нажмите кнопку мыши или через меню - Пометить неучитываемые точки - Пометить точку. Можно пометить (распометить) сразу несколько точек ( до конца, до начала, следующие 10, предыдущие 10) для этого в меню - Пометить неучитываемые точки нужно вызвать соответствующую команду. Помеченные точки на графике выделяются другой формой точки.

Через меню Настройка - Опции пользователь попадает в окно настройки Окна.

1) Можно задать, какую часть высоты окна занимает таблица (Высота таблицы). Высоту можно настроить мышкой сдвигая границу между таблицей и графиком.

2) Можно задать с какой точностью нужно попадать в точку на графике, при передвижении курсора (Точность мыши (в пикселях)).

3) Можно задать размер точек графика (Размер точки графика (в пикселях)).

4) Можно задать размер выделенной точек графика (Размер выделенной точки (в пикселях)).

5) Можно задать высоту строк таблицы (Высота строк).

6) Ширина Оси Y в % от ширины графика (если подписи шкалы Y не входят в окно увеличьте этот параметр) может принимать значение от 0 до 100. По умолчанию значение 5.

Под чертой вводятся параметры, относящиеся к масштабам графика слева по оси X, справа по оси Y. Прежде всего, это тип масштабирования - жесткий или на максимум и минимум существующих кривых. Если масштаб жесткий, то можно редактировать значения максимума и минимума по осям.

Возможно выводить или не выводить декады на график ЭДС. Для выбора установите флажок (Вывод декад).

Если нужно, чтобы при изменении текущей точки на активном графике менялись текущие точки на всех остальных графиках, то поставьте флажок (Единая точка). В противном случае при изменении текущей точки на активном графике на других графиках текущие точки не изменятся.

Возможно выбрать форму точек для вывода графиков из списка (Крест, Диагональный крест, Прямоугольник и т.д.).

1) Помеченная точка (для вывода точек помеченных как не участвующих в расчете  $\sigma$ ).

2) Экспериментальная кривая.

3) Теоретическая кривая.

Через меню Настройка-Изменить шкалу (Shift-F6) можно изменять масштаб графика с жесткого на плавающий. Параметры жесткого масштаба задаются через меню Настройка-Опции.

### **2.3.6.3 Окно Сопровождений.**

Окно Сопровождений служит для просмотра и сравнения кривых  $Ro\tau$  - полевой и рассчитанной. При вызове окон работы с пикетами, считываются ЭДС, записанные в соответствующем файле данных, и автоматически рассчитываются значения  $Ro\tau$ .

В 1-ом столбце выводится номер точки на кривой. Во 2-ом столбце ставится признак неучитывания точки кривой при расчете обратных задач. В 3-ем столбце выводится время измерения (в миллисекундах). В 4-ом столбце выводится  $Ro\tau$  из файла. В 5-ом столбце выводится  $Ro\tau$ , рассчитанное от заданной среды. Редактировать значения нельзя, времена вводятся в таблице ЭДС, а остальные значения являются рассчитанными.

Опции окна полностью соответствуют опциям окна ЭДС.

Управление окна полностью соответствуют управлению окна ЭДС.

Шкалы графиков логарифмические.

### **2.3.6.4 Окно STau.**

Окно STau служит для просмотра и сравнения кривых STau - полевой и рассчитанной. При вызове окон работы с пикетами, считываются ЭДС, записанные в соответствующем файле данных и автоматически рассчитываются STau.

В 1-ом столбце выводится номер точки на кривой. Во 2-ом столбце ставится признак неучитывания точки кривой при расчете обратных задач. В 3-ем столбце выводится HTau рассчитанное для ЭДС из файла. В 4-ом столбце выводится STau рассчитанное для ЭДС из файла. В 5-ом столбце выводится HTau рассчитанное от заданной среды. В 6-ом столбце выводится STau рассчитанное от заданной среды.

Опции окна STau отличаются от опций окна ЭДС наличием настроек масштабирования осей X и Y. Шкалы графиков возможно задать логарифмические или линейные.

Управление окна полностью соответствуют управлению окна ЭДС.

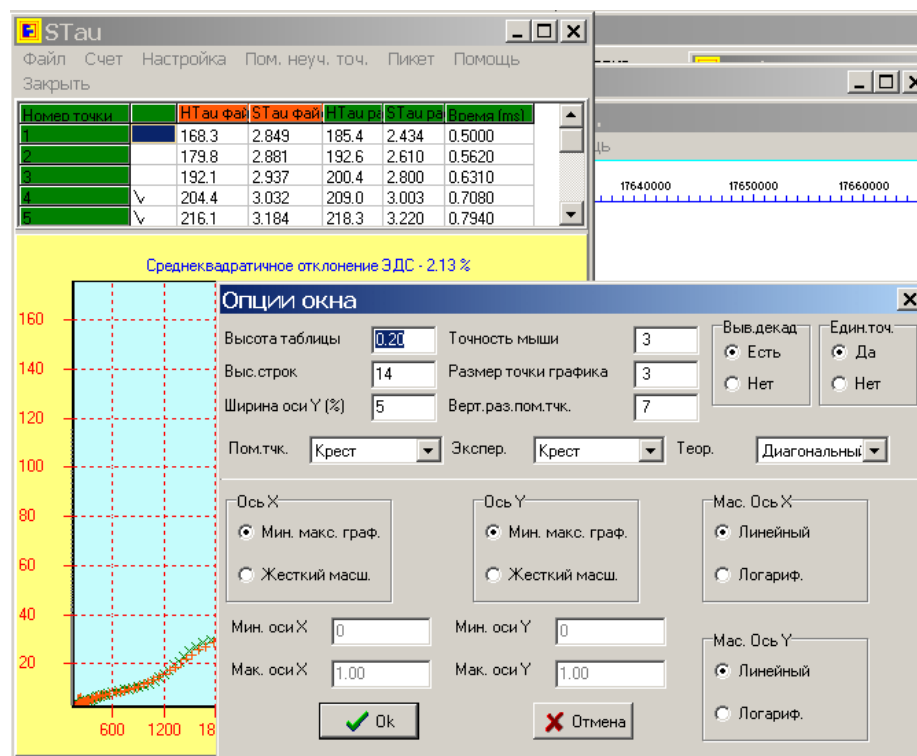


Рис. 2.28. Окно STau

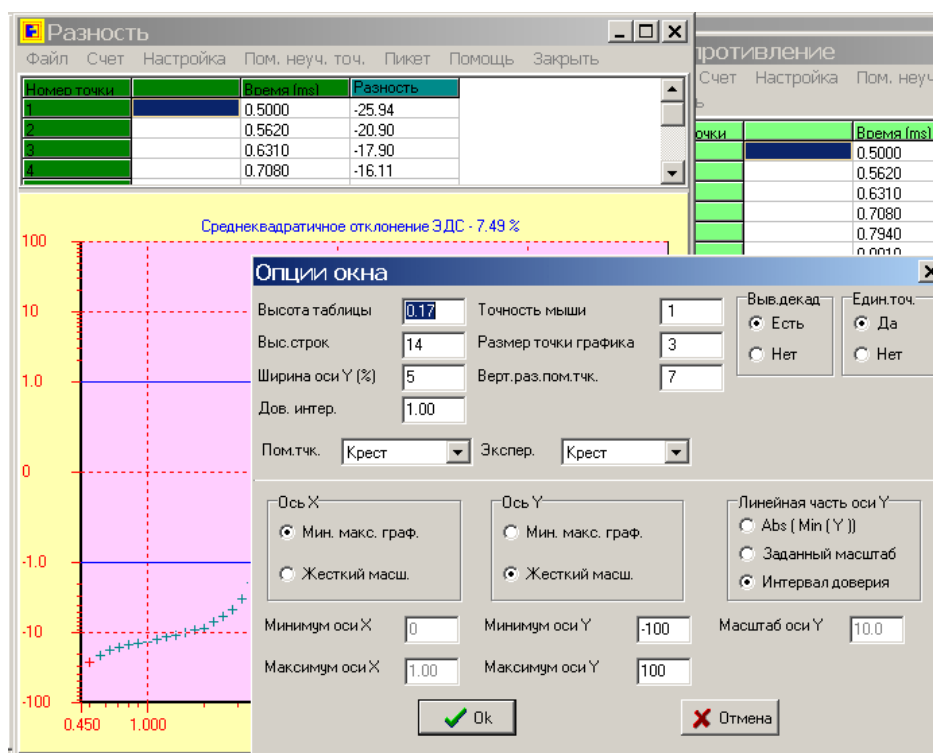


Рис.2.29. Окно разностей

### 2.3.6.5 Окно Разностей

Окно Разностей служит для просмотра и сравнения кривой разности ЭДС - полевой и рассчитанной.

$$RAZ_i = \frac{100 * (E_{Pi} - E_{Ti})}{E_{Pi}}$$

В 1-ом столбце выводится номер точки на кривой. Во 2-ом столбце ставится признак неучитывания точки кривой при расчете обратных задач. В 3-ем столбце вводится время измерения (в миллисекундах). В 4-ом столбце выводится отношение разности ЭДС полевой и рассчитанной к полевой ЭДС.

Шкалы графиков - логарифмическая по оси X и гиперболический арксинус по оси Y. На этом графике отмечается условный 'интервал доверия'. Предполагается, что если кривая отклонения находится внутри интервала, то среда подобрана хорошо. Этот график будет полезен на поздних стадиях интерпретации. Разумная ширина интервала должна отражать два обстоятельства. Во-первых, какого минимального уровня расхождения полевой и теоретической кривых ( $\sigma$ ) мы собираемся достигать в процессе инверсии. Во-вторых каков уровень точности полевого материала. При поставке Системы ширина интервала определена в 1%. Такой интервал удобен при работе с полевым материалом хорошего качества, а также при экспериментах с псевдополевыми кривыми.

Опции окна STau отличаются от опций окна ЭДС

1) Возможностью выбрать величину в пределах которой график разностей откладывается в линейном масштабе. По умолчанию – это минимальное значение Разности, т.е. линейного интервала практически нет. Возможно ввести свое значение или масштабировать на доверительный интервал. Для выбора установите флажок (Линейная часть оси Y). Если пользователь масштабирует на свое значение (флажок Заданный масштаб), то нужно ввести значение масштаб оси Y.

2) Возможностью задать значение доверительного интервала (Дов.инт. (в %)).

### 2.3.6.6 Окно Импульса.

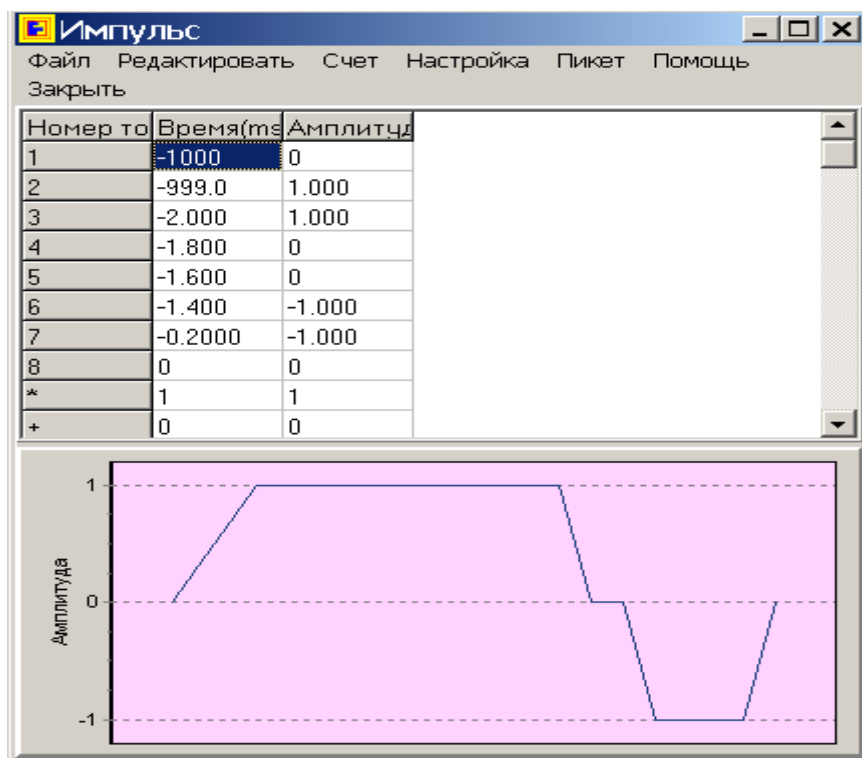


Рис.2.30. Окно импульса

Окно импульса служит для ввода и редактирования импульса. Если питающий импульс тока по форме значительно отличается от импульса Хевисайда (например, короткий или с непрямоугольным фронтом), и вы считаете, что это необходимо учесть в прямой задаче и при автоматическом подборе, то необходимо задать в этом окне нужную форму импульса или считать импульс из файла данных о импульсе. Нулевая точка отсчета

- ОБЩАЯ для описания импульса и для регистрируемой кривой отклика. Задавая различные формы импульса, нужно иметь ввиду, что трансформация в RoTau рассчитана все же на ступенчатое изменение тока.

В 1-ом столбце задается номер точки. Во 2-ом столбце вводится время (в миллисекундах). В 3-ем столбце вводится амплитуда. За 1 принято значение тока, заданное в окне тока.

Ниже численного представления импульса выводится его графическое представление. По оси X откладывается время. По оси Y откладывается амплитуда.

Разница времен между узлами выводится в логарифмическом масштабе.

Максимальное число узлов - 20, минимальное - 1, т.е. импульс Хевисайда. Добавить узел можно через меню - Редактировать и Добавить или клавишами Shift-Ins. Удалить узел можно через меню - Редактировать и Удалить или клавишами Shift-Del. Для редактирования времени и амплитуд узлов необходимо подвести курсор к интересующему параметру и начать ввод цифр. Окончание ввода - Enter или выбор другого редактируемого параметра.

Можно умножить все значения столбца Времен (Амплитуд) на некоторое значение, если наберете число в предпоследней строке соответствующего столбца, помеченной знаком "\*", или через меню - Редактировать - Домножить Амплитуды (Домножить время). Можно прибавить ко всем значениям столбца Амплитуд или времени некоторое значение если наберёте число в последней строке соответствующего столбца, помеченной знаком "+", или через меню - Редактировать - Прибавить к Амплитудам (Прибавить к временам).

Нужно помнить, что первая и последняя амплитуды должны быть нулевыми, а времена образуют растущую последовательность:

$$A_1=0, A_n=0, t_1 < t_2 < \dots < t_n, n \leq 20.$$

Можно записать информацию о текущем импульсе в файл. Для этого необходимо выбрать директорию для записи файла и набрать имя файла. Файл будет содержать информацию о количестве узлов, временах и амплитудах узлов. Файл будет создан в формате файла импульса системы Подбор. Вызов записи через меню Файл – Сохранить файл импульса, клавиша F2.

Можно ввести информацию об импульсе из файла. Для этого нужно выбрать имя файла. Файл должен соблюдать формат файла импульса Системы Подбор. Вызов чтения через меню Файл – Открыть файл импульса, клавиша F3.

### 2.3.6.7 Окно Установки и Тока.

Окно установки служит для ввода и редактирования параметров установки и силы тока. Введенные параметры установки участвуют в расчетах трансформант и теоретических кривых. При вызове окон работы с пикетами, считывается установка и ток, записанные в соответствующем файле данных. При вызове нового файла, считывается установка и ток из вызываемого файла.

В окне вводится значение тока в амперах. На него нормируются все значения амплитуд импульса заданных в окне импульса. Для импульса Хевисайда (ступенька) это обычное значение амплитуды тока.

Рассмотрим следующий пример установки зондирования: - Прямоугольная генераторная петля со сторонами  $A = 300$  метров и  $B = 200$  метров, 3 витка. Ток в генераторной петле 15 Ампер. Компактная приемная многovitковая рамка (1000 витков) со стороной 1 метр; на выходе рамки включен предусилитель с коэффициентом 200.

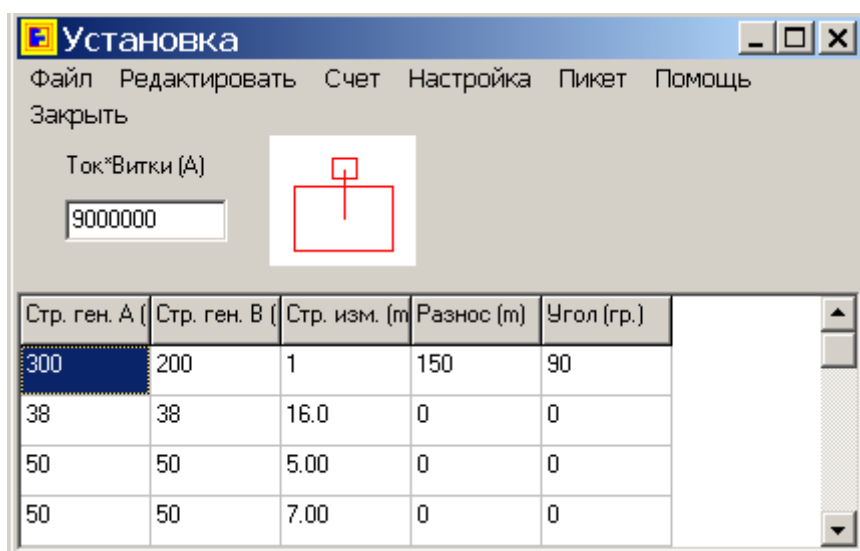


Рис. 2.31. Окно выбора установок

При такой установке зондирования, для ее характеристики нужно ввести следующие параметры: длины сторон А и В генераторной петли (300 и 200 метров), длину стороны измерителя задать 1 метр (длина стороны рамки), в качестве разноса задать расстояние между центром генераторной петли и центром рамки ( 150 метров ), угол - 90 градусов.

Название параметра 'Ток' в общем смысле условное название. В качестве тока нужно ввести ток в генераторной петле умноженный на все коэффициенты усиления. В нашем случае нужно перемножить: 3 витка в генераторной петле ( $G = 3$ ), 1000 витков в приемной рамке ( $R = 1000$ ), коэффициент усиления предусилителя - 200 ( $U = 200$ ), ток 15 Ампер ( $C = 15$ ). Тогда в параметр Ток мы должны ввести:

$$\text{Ток} = G * R * U * C = 3 * 1000 * 200 * 15 = 9000000 \text{ (Ампер)}.$$

Необходимо подчеркнуть, что все геометрические параметры установки должны быть реальными. Важнейший параметр приемного датчика - эффективная площадь. При вводе параметров. Нужно в качестве стороны измерителя ввести сторону рамки, а отношение эффективной площади рамки к ее геометрической площади ввести множителем в ТОК. Если рамка является круглой, то в качестве длины стороны нужно использовать величину:

$$L = \sqrt{\pi} * R,$$

тогда площади реальной круглой рамки и прямоугольной рамки в Подборе будут равны.

При использовании некоторых установок неважно, куда входит множителем отношение эффективной и реальной площадей, но, чтобы уменьшить риск путаницы и ошибок, мы настоятельно рекомендуем всегда все усиливающие коэффициенты вводить в Ток.

В 1-ом столбце задается сторона генератора А (в метрах). Во 2-ом столбце задается сторона генератора В (в метрах). Обратите внимание, генератор может задаваться в виде прямоугольника. В 3-ем столбце вводится сторона приемника (в метрах). В 4-ом столбце вводится расстояние между центрами генератора и приемника (в метрах). В 5 -ом столбце задается угол между сторонами генератора и приемника (в градусах).

В 1-ой строке содержится информация об установке, которая была в файле, считанном в последний раз. В остальных строках содержится информация об установках, для которых параметры уже насчитаны и содержатся в файле Ustan.eta. Если курсор находится в 1-ой строке, то в случае, если информации о такой установке не содержится



в файле Ustan.eta, она будет насчитана и помещена в файл при запуске на счет. Редактирование параметров установки возможно только в первой строке. При создании нового файла записывается информация об установке, которая выделена курсором. Если запущен расчет теоретических кривых и Система сообщила, что данных о такой установке у нее нет, то можно вернуться в окно установки и выбрать из тех установок, параметры которых уже насчитаны, достаточно близкую и посчитать с этой установкой. В правом верхнем углу окна схематически нарисована установка.

Для редактирования параметра установки (только если курсор в первой строке) необходимо подвести курсор к интересующему параметру и начать ввод цифр. Окончание ввода - Enter или выбор другого редактируемого параметра.

Старые, ненужные установки можно удалять из файла Ustan.eta. Выберите ненужную установку и нажмите Shift-Del или через Меню-Редактировать-Удалить установку.

### 2.3.6.8 Окно Объектов.

Окно Объектов служит для просмотра и редактирования объектов неоднородностей в среде. В Окне «Объекты» доступны для формирования и редактирования включения-объекты в том слое, который определен положением курсора в Окне «Среда». Всего в среде объектов может быть не более 5, значит в данном слое тоже не более 5, в зависимости от наличия объектов в других слоях. Объект в плане является сектором кольца и занимает по высоте всю толщину слоя. В плане рисуются объекты для текущего слоя и установка. После коррекции объектов план перерисовывается. Объект задается следующими параметрами :

- 1) R1 - внутренний радиус сектора в метрах,
- 2) R2 - внешний радиус сектора в метрах,

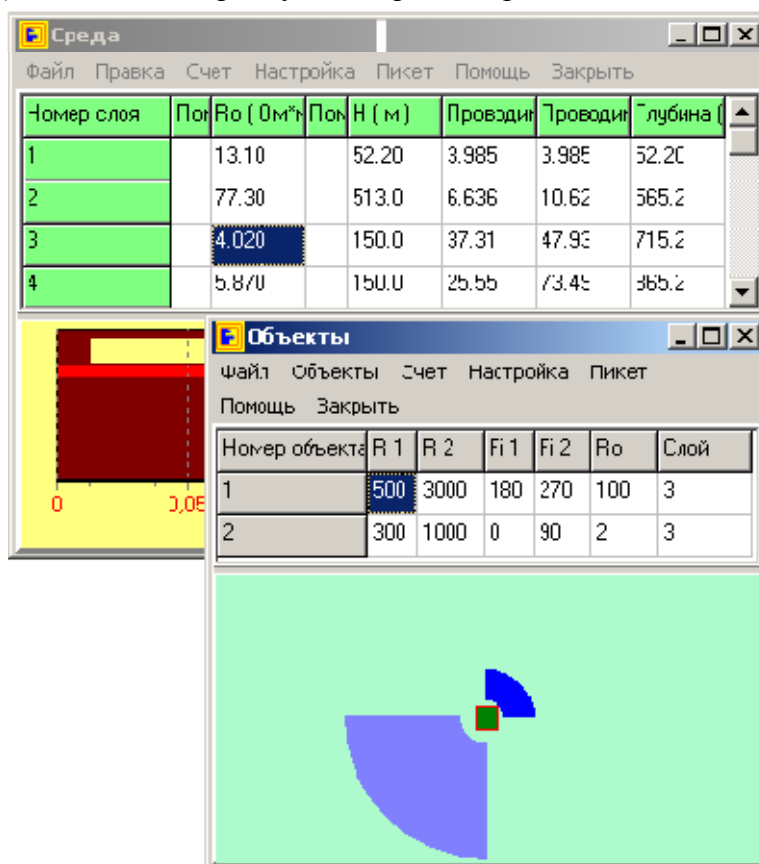


Рис.2.32. Локальные объекты во вмещающей среде

- 3)  $Fi1$  - начальный угол сектора в градусах
- 4)  $Fi2$  - конечный угол сектора в градусах
- 5)  $Ro$  - сопротивление неоднородности ( $Om * m$ )

Для задания объекта необходимо чтобы:

- 1)  $R1 > 0$ ,
- 2)  $R2 > 0$ ,
- 3)  $R2 > R1$ ,
- 4)  $Fi2 > 0$ ,
- 5)  $Fi2 > Fi1$ ,
- 6)  $Fi1 < 360$ ,
- 7)  $Fi2 \leq 360$ ,
- 8)  $Abs((Ro - Ro_{\text{слоя}}) / Ro_{\text{слоя}}) > 0.001$

При запуске расчета MAG3D проверяется перекрываются объекты в слое или нет. Для каждого слоя среды существуют свой набор объектов.

В 1-ом столбце выводится номер объекта. Во 2-ом столбце вводится  $R1$  - внутренний радиус сектора (в метрах). В 3-ем столбце вводится  $R2$  - внешний радиус сектора (в метрах). В 4-ом столбце вводится  $Fi1$  - начальный угол сектора (в градусах). В 5-ом столбце вводится  $Fi2$  - конечный угол сектора (в градусах). В 6-ом столбце вводится  $Ro$  - сопротивление неоднородности ( $Om * m$ ). В 7-ом столбце выводится номер текущего слоя.

Список объектов для каждого пикета можно записать в отдельный файл – файл неоднородностей через меню – Файл – Записать файл неоднородностей, клавиша F2. Файл будет содержать информацию о количестве объектов, номерах слоев в которых они содержатся и формах объектов. Для этого необходимо выбрать директорию для записи файла и набрать имя файла. Файл будет создан в формате файла объектов системы Подбор. Позднее можно будет считать и ввести в систему информацию об объектах для любого пикета из файла объектов, через меню – Файл – Читать файл неоднородностей, клавиша F3.

#### 2.3.6.9 Окно Дополнительной информации.

Информация о пикете	
Z (м)	-369.000
X (м)	17661664
Y (м)	6655902
Район	Пайгинская_э
Дата	1979
Профиль	41 19 80
Пикет	339
Файл	041-339.LPG

Рис.2.33. Информация о пикете

Окно дополнительной информации (рис.2.33) служит для просмотра и ввода информации о пикете.

В 1-ой строке вводится превышение пикета над нулевой точкой (в метрах) ось направлена вниз. Во 2-ой строке вводится Х координата пикета (в метрах). В 3-ей строке вводится Y координата пикета (в метрах). В 4-ой строке вводится район измерения (до 12 символов). В 5-ой строке вводится дата измерения (до 12 символов). В 6-ой строке вводится название профиля (до 12 символов). В 7-ой строке вводится название пикета оно используется при отображении на карте и профиле (до 12 символов). В 8-ой строке выводится название файла.

### 2.3.7 Форматы файлов, используемые системой.

Система поддерживает 3 формата данных. 1-ый формат – формат файла данных о пикете. 2-ой формат - формат файла данных о импульсе. 3-ий формат - объект-файлы. Все форматы в кодах ASCII, поэтому файлы могут быть созданы любым редактором, хотя несомненно, более удобно создавать их в Системе. Форматы всех чисел любые, только необходимо разделять числа хотя бы ОДНИМ ПРОБЕЛОМ.

#### 2.3.7.1 Формат файла данных системы Подбор.

Это основные файлы, хранящие НЕОБХОДИМУЮ информацию для функционирования Системы. Можно сказать, что Система всегда загружена каким-либо Рабочим файлом. В процессе работы по желанию пользователя, можно загрузить любые Рабочие файлы из любого каталога. Формат Рабочего файла тот же, что и в программах комплекса Подбор: ПОДБОР 3.7, ПРОФИЛЬ 2.0, СЛОЙ 2.0, FAST3D 2.0:

В первых 4-ех строках данные о месте работы, дате измерений, профиле и пикете. Все данные должны содержать до 12 символов (остальные символы программой не воспринимаются). В 5-ой строке содержатся данные о стороне генератора А (в метрах), стороне измерителя (в метрах), разnose (в метрах) и угле между линией соединяющей центры измерителя и генератора и стороной X генератора (в градусах).

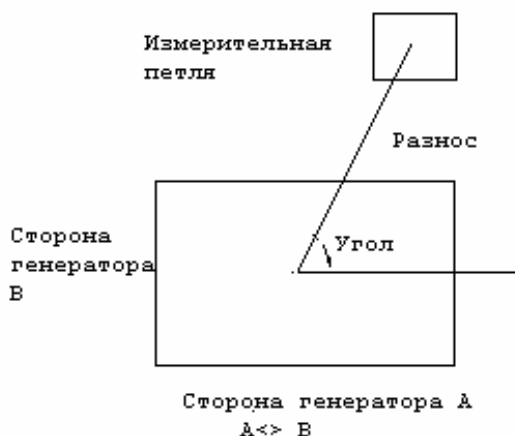


Рис.2.34. Схема приемно-питающей установки (петля-петля) как она понимается в системе Подбор

В 6-ой строке ток (ток\*количество витков генератора\*количество витков измерителя) (в Амперах ) и стороны генератора А и В. Если здесь А и В отсутствуют, то генераторный контур подразумевается квадратным со стороной А из 5-ой строки. В 7-ой строке стоит разность (в метрах) по высоте между 0 точкой отсчета высоты и высотой расположения дневной поверхности пикета, ось направлена вниз, координата Х (в метрах), Y (в метрах). 8-ая строка содержит количество временных значений (вещественное). Последующие строки содержат слева значение времени (в миллисекундах), справа значение ЭДС (в милливольтках). В последней строке содержится ноль (вещественный). Кроме того, в файле может содержаться информация о разрезе. В этом случае в 8-ой строке 2-ое число (целое) есть количество слоев в разрезе. В этом случае в последующих строках за временем и ЭДС следуют удельное сопротивление слоя (в Ом\*м) и мощность слоя (в метрах). Если значение параметра среды больше или равно 1e+2, то Система воспринимает значение параметра, как бесконечное. Количество точек по времени до 2000, количество слоев разреза до 20.

### Пример файла данных.

Участок - Severnyi, дата - 09.09.91, профиль- 3-prof, пикет - 301, сторона генератора - 500 (м)(квадрат), сторона измерителя - 100 ( м ), разнос 1000 (м), угол 45 ( градусов ), ток – 64 ( А ), дневная поверхность пикета на 10 (м) выше 0 точки отсчета, координата Х - 1000 ( метров ), координата Y - 0 (метров), число точек на кривой - 10, число слоев в разрезе 4, основание в разрезе бесконечной мощности и сопротивления.

```
-----
Severnyi
09.09.91
3-prof
301
0.500E+03    0.100E+03    0.100E+04    0.450E+02
0.640E+02  500 500
0.100E+02  1000 0
0.100E+02                                         4
0.280E+01    0.311E+03                                1.00E+02 1.00E+03
0.314E+01    0.248E+03                                5.00E+01 1.00E+03
0.352E+01    0.186E+03                                1.00E+01 5.00E+02
0.396E+01    0.135E+03                                1.00E+20 1.00E+20
0.444E+01    0.955E+02
0.498E+01    0.665E+02
0.559E+01    0.463E+02
0.627E+01    0.319E+02
0.703E+01    0.221E+02
0.789E+01    0.155E+02
0.000E+00
-----
```

### 2.3.7.2 Формат файла Импульса.

В 1-ой строке содержится количество узлов импульса ( целое ). В последующих строках слева время ( в миллисекундах ), справа амплитуда в относительных величинах ( относительно тока, заданного в рабочем файле ). Если количество узлов 0 или 1, то подразумевается, что это импульс Хевисайда ( Ступенька ). Должно быть:

$$A1=0, \quad A_n=0, \quad t1 < t2 < \dots < t_n, \quad n \leq 20.$$

### Пример импульс-файла.

4	
-1001	0
-1000	1
0	1
0.01	0

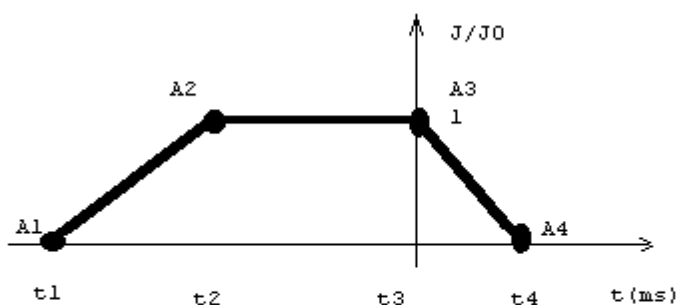


Рис.2.35. Представление формы импульса тока в системе Подбор

### 2.3.7.3 Формат файла объектов

В 1-ой строке содержится количество объектов (целое). В последующих строках для каждого объекта выводятся 6 параметров:

- 1) номер слоя, в котором содержится неоднородность (целое),
- 2) внутренний радиус неоднородности (в метрах),
- 3) внешний радиус неоднородности (в метрах),
- 4) начальный угол (в градусах),
- 5) конечный угол (в градусах),
- 6) удельное сопротивление (в Ом\*м).

Максимальное количество объектов - 5.

### Пример Объект-файла.

Файл содержит 2 неоднородности. В 1-ой строке описание неоднородности во 2-ом слое. Внутренний радиус 200 метров, внешний радиус 400 метров, сектор от 0 до 180 градусов, сопротивление 10 (Ом\*м).

Во 2-ой строке описание неоднородности в 3-ем слое. Внутренний радиус 500 метров, внешний радиус 1000 метров, сектор от 30 до 240 градусов, сопротивление 100 (Ом\*м).

DIS.NEO

-----					
2 N	R1 (м)	R2 (м)	Fi1 (гр.)	Fi2 (гр.)	Ro (Ом*м)
2	200	400	0	180	10
3	500	1000	30	240	100
-----					

#### 2.3.7.4 Формат файла создаваемого для других систем.

В 1-ом столбце содержится координата X, во 2-ом столбце содержится координата Y, в 3-ем столбце содержится значение в выводимой точке, в 4-ом столбце содержится название пикета, в 5-ом столбце содержится название профиля.

#### Пример файла создаваемого для других систем.

Elect.dat

-----  
1.76813800E+0007 6.67363500E+0006 8.00999985E+0001 т664 р.Тальменка  
1.76429840E+0007 6.62493800E+0006 1.88999996E+0001 24 р.Тальменка

### **3 Практическое применение системы Подбор**

Содержание этой главы включает два аспекта. Первый подразумевает набор рекомендаций и сведений, необходимых для эффективных манипуляций с Системой в рамках интерпретационного процесса с данными ЗСБ при учете методических особенностей этого метода. И, разумеется, мы должны и имеем такую возможность продемонстрировать ряд успешных примеров применения системы Подбор (в составе ЗСБ) при решении реальных геолого-геофизических задач.

#### **3.1 Методические рекомендации или, что должен знать пользователь, приступая к интерпретации полевых данных**

##### **3.1.1 Некоторые предварительные замечания**

Центральным, наиболее важным содержательным элементом системы Подбор является возможность анализа результата полевого зондирования на отдельном пикете. В этот анализ входит расчленение зондируемого массива пород на слои (определение модели георазреза), определение мощностей и удельных сопротивлений слоев, при которых теоретический расчет сигнала минимальным образом отличается от результата полевого зондирования. Из результатов анализа на каждом пикете исследуемой площади или профиля, как из кирпичиков, складывается общая картина геоэлектрического, а затем геологического строения участка. Заметим, что на каждом пикете полевой результат зондирования трактуется с позиции горизонтально-слоистого, латерально-однородного строения среды. Такой подход, с использованием одномерной интерпретации на каждом пикете, в значительном большинстве случаев оправдывает себя благодаря пространственным особенностям строения исследуемых осадочных массивов пород и относительной локальности зондирований.

Несмотря на такой «упрощенный» подход процесс анализа-интерпретации остается сложным и трудно формализуемым. В силу разнообразия ситуаций и условий, а также ограниченных возможностей программных средств, на настоящем этапе вряд ли возможно сформулировать четкую программу действий, которая годится на все случаи жизни. Поэтому изложение вопроса начнем с отдельных соображений и советов, которые зачастую не выглядят связно между собой, но отражают разные аспекты проблемы, о которых должен помнить пользователь.

Читатель, вероятно, уже понял, что предлагаемая методика одномерной инверсии опирается на теоретические расчеты для слоистых сред в классической электродинамической постановке. Т.е. опирается на принципы, в основе которых ясные физические явления и широкие возможности их моделирования. Мы исключили из рассмотрения выявление и анализ так называемых «тонких эффектов» в кривых зондирования, которые некоторые исследователи выделяют через дифференциальные трансформации, в частности, через трансформацию STau. Наш многолетний опыт анализа «тонких эффектов» показал, что в подавляющем большинстве случаев они связаны либо с погрешностью измерений, либо с дефектами программ обработки. В этом плане нужно с большой осторожностью относиться к соблазнительным или скороспелым обещаниям воспроизводить по зондированиям подробную характеристику георазреза, почти каротажного содержания.

В то же время мы считаем трансформацию  $STau$  исключительно удобным и физичным инструментом анализа, не потерявшим своей привлекательности и в настоящее время. Поэтому она используется и в системе Подбор, и в программе ПРОБА, которая входит в аппаратурно-методическую систему ЦИКЛ и используется на этапе предварительной обработки и анализа полевого материала.

Многолетний опыт работы с полевым материалом различных регионов убеждает нас, что в подавляющем большинстве случаев у нас нет потребности выходить за рамки классической электродинамической постановки инверсионной задачи, особенно при глубинных (более 500 м) исследованиях, при размерах установок более 200 – 300 м..

Однако при уменьшении размера генераторной установки происходит уменьшение доли электродинамического процесса и возрастание доли дисперсных процессов (индукционная вызванная поляризация, магнитная вязкость). При этом в некоторых регионах или на некоторых участках работ при использовании установок размером менее 50 – 100м проявление «посторонних» процессов может иногда становиться заметным.

На представленном рядом рисунке приведены две кривые кажущегося сопротивления, полученные на соосной и разнесенной установках. Район работ – республика Татарстан. Размер генераторной петли 100х100 м. Приемник – компактный датчик ПДИ-100, с моментом 10000 кв. м. В соосной установке приемник расположен в центре генераторной петли, в разнесенной установке – отнесен от центра на 100 м. Из сопоставления кривых видно, что восходящая ветвь кривой соосной установки более крутая, чем разнесенной, хотя с позиций электродинамики они должны совпадать. Наблюдаемое расхождение есть следствие влияния процесса низкочастотной индукционной вызванной поляризации. Такое соотношение кривых устойчиво, с небольшими различиями, наблюдается на исследованной площади, где выполнено более 100 зондирований.

Подобное влияние ВП происходит, видимо, в скрытом виде довольно часто, однако оно не отразится на расчленении и параметризации разреза, а только на определении удельного сопротивления его высокоомного основания.

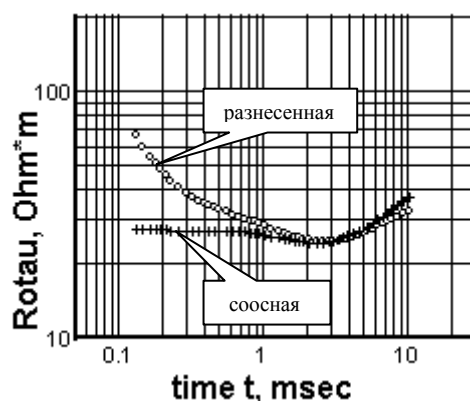


Рис. 3.1. Проявление процесса ВП

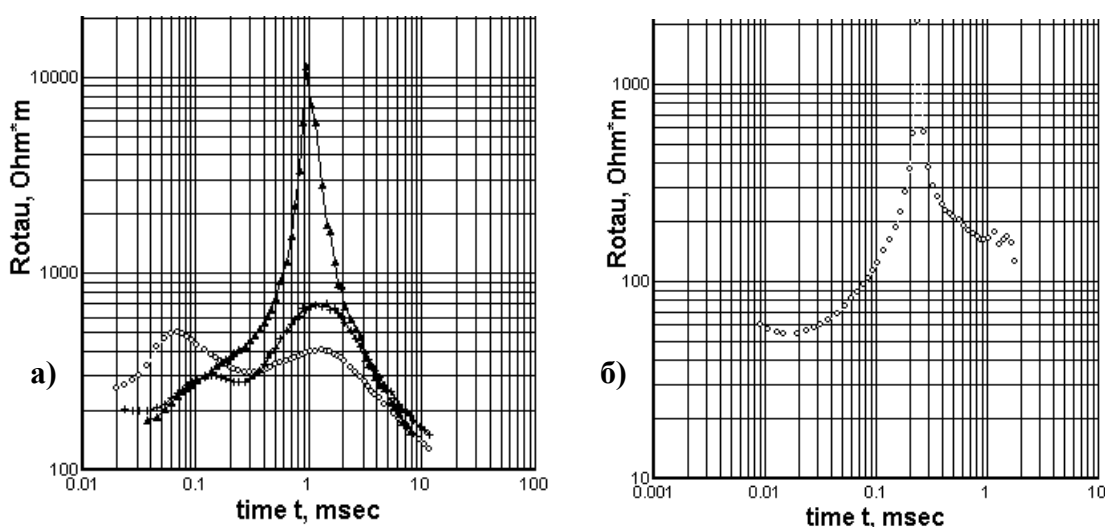


Рис. 3.2. Примеры сильного проявления процессов «быстрого ВП»

В редких случаях вклад дисперсных процессов оказывается настолько сильным, что полностью лишает нас возможности выполнить интерпретацию полученной кривой. На



представленных на рис. 3.2. примерах мы имеем дело с проявлением процесса «быстрого ВП». На примере а) кривые, полученные с установкой 100x100 м на одном из профилей Норильского района. Среди рядом расположенных пикетов одна из трех кривых имеет значительное проявление процесса ВП и неинтерпретируема. Заметим, что в данном случае искаженная кривая эдс не имеет перехода через ноль. На примере б) кривая зондирования получена с установкой 40x40 м (Новосибирская область). Наложение процесса ВП привело даже к переходу сигнала через ноль. Однако, если отбросить правую часть кривой, с времен более 0.1 мс, то оставшаяся часть может быть проинтерпретирована, хотя информационные потери очевидны.

Интерпретационная часть геофизики в большинстве своем построена на решении некорректных задач. Именно такой и является процедура расчленения разреза (выбора модели разреза) и определения параметров слоев путем подбора. Очевидно, что стремление к устойчивости конечного результата инверсии требует разумного ограничения количества определяемых параметров, т.е. требует определенной генерализации разреза. Если эта генерализация значительна, то *мы определяем не параметры реального разреза, а ищем его приближенный количественный образ*, и определяемые параметры перестают быть параметрами слоев, а превращаются в некие *эффективные параметры*, информационная ценность которых во многих случаях всё же может оставаться высокой. В то же время мы часто сталкиваемся с разрезами достаточно контрастными, с благоприятными сочетаниями параметров слоев, в которых определяемые параметры можно действительно считать истинными параметрами слоев.

Здесь уместно остановиться на разрезах благоприятных и неблагоприятных для электроразведки. Если не ограничиваться простейшими ситуациями, то благоприятный разрез, пусть даже многослойный, должен иметь следующие особенности. 1) Чередование слоев проводящих и высокоомных, с высокой контрастностью. 2) Каждый более глубокий проводящий слой имеет продольную проводимость не меньше суммы проводимостей вышележащих. 3) Расстояние между проводящими слоями – не менее 20 – 30% от глубины вышележащего. Если эти условия выполняются достаточно уверенно, определяемые параметры слоев будут близки к истинным, однозначность, устойчивость решения высокая (низка эквивалентность). Работа геофизика в таких условиях приносит высокое удовлетворение и вселяет уверенность в результативности электроразведки. И напротив, работа в условиях неконтрастных разрезов иногда приносит разочарование в пользу электроразведки. Такая ситуация зачастую толкает геофизика к поиску «погранично допустимых» решений, а иногда и к поиску «чудес». Думаем, что возможности исследовательского моделирования, имеющиеся в системе Подбор, помогут пользователям избежать заблуждений.

В программе одномерной инверсии используется метод подбора в нескольких его модификациях. Эти модификации разными способами решают одну задачу – *в рамках выбранной модели среды* минимизировать различие между экспериментальными и теоретическими значениями эдс переходного процесса. В качестве меры их различия используется среднеквадратическая оценка расхождения. В каком-то смысле этот подход сродни методу наименьших квадратов, так что в нашем случае можно полагать, что количество экспериментальных значений ЭДС должно в несколько раз превышать количество параметров (мощностей слоев и их удельных сопротивлений), которые мы собираемся определить. Чем больше это превышение, меньше «зашумленность» данных, точнее «угадана» модель среды, тем надежнее результаты определения параметров. Так, если полевая кривая состоит, например, из 20 точек (одна декада по времени), то при выполнении указанных условий можно пытаться решать обратную задачу с определением 4-х - 5-и параметров (трехслойный разрез), но никак не 10-и.

При оценке качества полевых данных, которые вы собираетесь интерпретировать, следует обратить внимание на их «гладкость», «отсечь» на ранних временах ненадежные

точки, содержащие технические погрешности (влияние фронта тока, «зашкаливания» сигнала), на поздних – отсечь точки, содержащие «шумоподобный» разброс. Такие оценки и редакция данных производится, как правило, с помощью программы ПРОБА на этапе предварительной обработки.

При анализе гладкости и разброса на конце кривой следует учесть следующую особенность субъективного визуального восприятия графического изображения данных. Традиционно при изображении кривых ЭДС и кажущегося сопротивления используется билогарифмический масштаб, естественный для такого рода изображений. В то же время при визуальном анализе сами кривые для подобных оценок неравноценны. Кривая эдс отображена крутопадающим графиком, охватывающим по вертикали до 6 – 8 порядков. Высокая крутизна маскирует восприятие вертикальных шумовых уклонений точек. Этот же материал, представленный в виде кривых кажущегося сопротивления (квазигоризонтальный график), позволяет наблюдателю легко выделить шум, элементы «негладкости» графика. Еще более ярко «негладкость» данных проявляется в кривых STau.

С такими же особенностями происходит *визуальная* оценка степени согласованности полевой и теоретической кривых в процессе интерпретации. В подавляющем большинстве случаев эту согласованность визуально лучше оценивать по кривым кажущегося сопротивления (в Подборе – окно «сопротивление»). Иногда для этих целей привлекаются кривые STau (в Подборе – окно «STau»). Для более подробного анализа характера расхождения значений ЭДС интерпретатор может использовать график процентного расхождения «разность».

Сама программа Подбор оперирует со значениями ЭДС. Объективной *интегральной* мерой различия полевых  $E_p(t_i)$  и теоретических  $E_t(t_i)$  значений ЭДС является их среднеквадратическое расстояние «сигма», которое выдается интерпретатору на каждом этапе процесса подбора.

### 3.1.2 Различные аспекты проблем эквивалентности

**Введение в проблему.** Сложности, встречающиеся у интерпретатора на этапе определения структуры и параметров разреза и препятствующие получению хорошей точности этого определения, вполне объективны и объединены в понятие «эквивалентность», т.е. неоднозначность. Суть этого понятия в том, что одной (дискретно заданной) полевой кривой зондирования  $E_p(t_i)$  в общем случае можно поставить в соответствие семейство теоретических,  $E_t(t_i)$ , с разными моделями и набором параметров в рамках каждой модели.

Общая постановка проблемы эквивалентности и пути её разрешения применительно к нашим интересам представлены в работах [31] , [32] . В работах [39] , [41] описан первый ценнейший опыт интерпретации реальных данных ЗСБ с учетом информационной значимости геоэлектрических параметров.

В аналогичных программных комплексах российских и зарубежных разработчиков (например, в комплексах ЭРА, TEMIX), содержится аппарат оценки неопределенности результата интерпретации, оценки значимости вклада тех или иных слоев, который построен на основе информационной матрицы. Мы не спешили ввести в нашу Систему такой инструмент по ряду соображений. Во-первых, для этих целей можно использовать программу СЛОЙ, являющуюся также нашей разработкой. Во-вторых, понимающий геофизик без особого труда сможет выполнить такие оценки в рамках возможностей системы Подбор, а непонимающему вряд ли поможет довольно непростой в трактовке дополнительный инструментарий. В третьих, опираясь на мнение авторитетных геофизиков (можно сослаться, например, на работу [47] ), мы также считаем, что использование «информационной матрицы» не дает полноценной картины

эквивалентности, даже в рамках «шумовой» составляющей, и совсем оставляет «за кадром» «модельную» составляющую эквивалентности.

Конечно, отсутствие такого инструмента исследования мы не считаем достоинством программы, и в дальнейшем, видимо, введем его в состав Подбора, если удастся найти приемлемую форму учета указанных замечаний.

Группу вопросов эквивалентности по своему происхождению можно разделить на две подгруппы [32]. В первую подгруппу входят вопросы эквивалентности выбора модели, во вторую, в рамках выбранной модели, – связанные с погрешностью полевого материала. Вопросы второй подгруппы можно назвать «чистой» эквивалентностью, под которой большинство геофизиков и понимают термин «эквивалентность». Понятие это достаточно формализовано и может быть исследовано на основе теоретических численных экспериментов. Для формальных оценок эквивалентности в рамках заданной модели часто используется информационная матрица [19].

Через какие факторы может проявить себя эквивалентность? Эквивалентность возрастает (т.е. возрастает «вилка» возможных значений некоторых из определяемых параметров) при увеличении погрешности исходных данных, сокращении интервала времен регистрации сигнала, переходе к более редкой шкале времен регистрации данных, при попытке увеличения числа определяемых параметров, например, при переходе к модели с большим числом слоев. Кроме того, одно из проявлений эквивалентности – получение разных значений параметров при запуске программ инверсии с разными вариантами стартовых значений параметров, либо при использовании разных программ инверсии.

В исследованиях по эквивалентности, как и вообще в интерпретации, следует помнить о так называемом «принципе Оккама». В одном из вариантов оригинальной формулировки он звучит так: «не множьте количество сущностей». В геофизике он принят как принцип «предпочтения самому простому объяснению наиболее вероятного наблюдаемого явления». В нашем случае он отражает предпочтение наиболее простым моделям сред.

Меры борьбы с эквивалентностью разноплановы и разнообразны и практически пронизывают ВСЕ вопросы, связанные выбором моделей, их параметризацией и стратегией работы с программой, дальнейшей геологической трактовкой результата инверсии. Эти вопросы мы будем затрагивать по мере изложения «рекомендаций».

Сейчас перейдем к рассмотрению проявления некоторых вариантов «чистой» и «модельной» эквивалентности, с которыми сталкиваемся при определении параметров, как правило, относительно «тонких» слоев, проводящих и высокоомных. В дальнейшем будем называть такие слои S-объектами и Т-объектами, с которыми связываются соответствующие виды эквивалентности, а также эквивалентности, наблюдаемые при наличии комбинаций этих объектов. Кроме того, будут рассмотрены некоторые проявления эквивалентности, связанные с ограниченной полнотой экспериментальных данных.

Напомним читателю элементы классификации **типов** геоэлектрических разрезов в зависимости от соотношения сопротивлений слоев. Базовая классификация – трехслойные разрезы, на основании которых строятся обозначения типов многослойных разрезов.

*Трехслойные разрезы:*

Тип Н:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ;

Тип К:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ;

Тип Q:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ ;

Тип А:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ;

*Примеры типов четырехслойных и пятислойных разрезов:*

Тип КН:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$ ;

Тип НА:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ ;

Тип НКН:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ ;

Тип КQH:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$ .

**S-объекты, S-эквивалентность.** S-объекты – относительно тонкие проводящие слои, характеризующиеся величиной продольной проводимости  $S = h/\rho$ . Суть проявления S-эквивалентности заключается в том, что при подборе параметров S-слоя мы можем получать ряд удовлетворительных решений  $h$  и  $\rho$  этого слоя, при которых сохраняется значение продольной проводимости этого слоя  $S \approx h/\rho$ . Иными словами, слои разной толщины, но одинаковой продольной проводимости отражаются в результатах зондирования схожим образом. Эта эквивалентность хорошо известна электроразведчикам, однако на ней мы задержим наше внимание, чтобы рассмотреть некоторые аспекты, не изложенные в литературе, а также продемонстрировать методику исследования эквивалентности.

Рассмотрим действие эквивалентности на конкретном примере трехслойного разреза типа Н с высокоомным основанием, с мощностью S-объекта (второго слоя) 50 м, залегающего на глубине 200 м:

Таблица 3.1

I	Pi	hi	Si	
1	40	200	5.0	
2	10	50	5.0	
3	500	$\infty$		

Подберем какой-либо файл данных с приемлемым диапазоном времен измерений и, используя его в качестве «шаблона», проведем расчет прямой задачи для данной модели. Сохраним результат счета и используем полученный файл в качестве полевого («псевдополевые» данные). Проведем интерпретацию этого файла в Подборе, причем, в стартовой среде установим ту же модель типа Н, но с мощностью  $h_2 = 10$  м. (опробование «тонкой» альтернативной модели), а параметры  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h_1$  будем подбирать (варьировать) обычным образом, в т.ч. с использованием программ автоматической инверсии.

В результате получим следующие параметры разреза (см рис. 3.3.):

Таблица 3.2

i	$\rho_i$	hi	Si
1	39.9	218	5.46
2	2.27	10	4.40
3	500	$\infty$	

В отличие от традиционных исследований S-эквивалентности мы не закрепляли  $S_2$ ,  $h_1$ , а «отпускали» все параметры, кроме  $h_2=10$  м и сопротивления основания разреза.

Полученное новое эквивалентное решение (см первый график  $\sigma$ ) входит в доверительный коридор значений ЭДС  $\pm 1\%$  и дает среднеквадратическую  $\sigma = 0.45\%$ . (вообще-то мы «опробовали»  $h_2 = 7, 10$  и  $15$  м и выбрали  $h_2=10$  м, как имеющий коридор  $1\%$ ).

Аналогичные испытания модели на альтернативу с «толстым» слоем дают величину  $h_2 = 80$  м, с тем же доверительным коридором и среднеквадратической  $\sigma = 0.416\%$ . Результаты испытаний на S-эквивалентность представлены на рис 3.3.

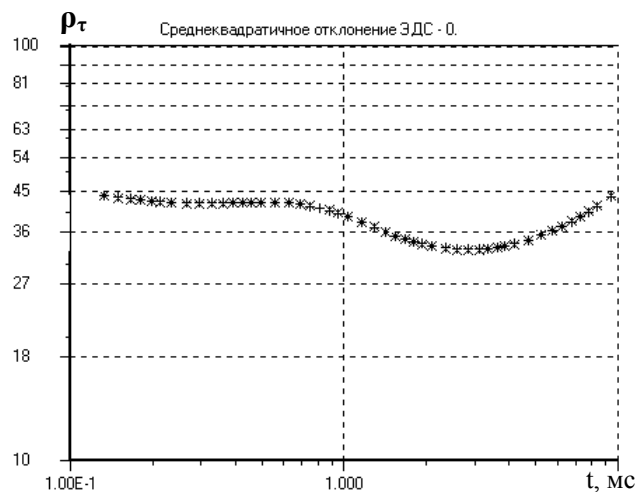
Итак, при доверительном коридоре результатов измерений  $\pm 1\%$ , в рамках данной модели можно варьировать толщиной S-объекта в пределах от 10 до 80 м! Фактически графики  $\sigma$  на рис. 3.3. отражают те различия, которые отличают модель с исходной толщиной S-слоя, от моделей с «тонким» и «толстым» слоями

Реальная полезная аномалия проявления фактической толщины S-слоя в рамках коридора  $\pm 1\%$  на самом деле «вылавливается» алгоритмами автоматической инверсии программы Подбор, и при высокой точности измерений может вывести нас на результат, близкий к реальной толщине S-слоя. С другой стороны, эта аномалия может «потеряться» в шуме с коридором 3-4% ( $\sigma = 2-3\%$ ), и мы приходим к тому результату, который получили. Зачастую уровень шума в экспериментальных данных в рассматриваемом диапазоне времен на некоторых приборах как раз и соответствует величине  $\sigma = 2-3\%$ , так что полученные оценки эквивалентности могут для таких приборов и условий измерения считаться реальными.

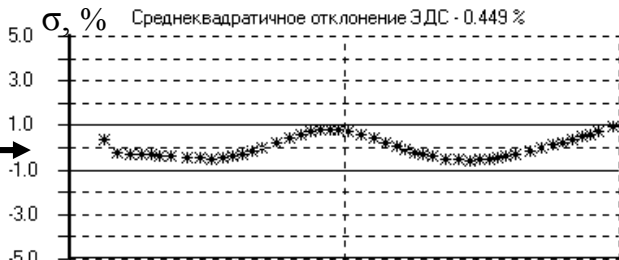
Чтобы численный теоретический эксперимент на эквивалентность приблизить к условиям натурного эксперимента, можно в значения ЭДС исходной модели вносить искусственный шум, соизмеримый с шумом экспериментальных данных. Если вы работаете с прибором «ЦИКЛ», и визуально на кривой кажущегося сопротивления не видите «дрожания», «шороха», то для имитации этих условий в численном теоретическом эксперименте можно вводить шум на уровне  $\sigma = 2-3\%$  и производить мягкое сглаживание зашумленной псевдополевой кривой ЭДС. Полученное при этом зашумление с  $\sigma = 1 - 1.5\%$  будет больше соответствовать реальной точности полевого материала. Эти зашумленные данные следует интерпретировать как обычные полевые кривые, не закрепляя толщину S-слоя. В этом случае оценки эквивалентности могут оказаться более обнадеживающими.

Если рассматривать более широкий диапазон параметров исходных моделей, то можно прогнозировать, что эквивалентность будет сужаться при уменьшении глубины S-объекта и увеличении доли его продольной проводимости. Т.е. если мы работаем с более проводящими объектами по сравнению с проводимостью перекрывающей толщи, то картина не будет столь разочаровывающей, как в рассмотренном примере.

исходная модель, 50 м			
$\rho_i$	$h_i$	$S_i$	$\sigma$
40	200	5.0	$\sigma_{\text{макс}} = 0$ $\sigma_{\text{ср}} = 0$
10	<b>50</b>	5.0	
	<b>225</b>	-середина пров. слоя	
	250	- глуб. «фундамента»	



«тонкий» слой, 10 м			
$\rho_i$	$h_i$	$S_i$	$\sigma, \%$
39.9	218	5.46	$\sigma_{\text{макс}} = 0.80$ $\sigma_{\text{ср}} = 0.449$
2.27	10	4.40	
	223	-середина пров. слоя	
	228	-глуб. «фундамента»	



«ТОЛСТЫЙ» слой, 80 м			
$\rho_i$	$h_i$	$S_i$	$\sigma$
40.1	186	4.65	$\sigma_{\text{макс}} = -0.79$ $\sigma_{\text{ср}} = 0.416$
14.6	<b>80</b>	5.48	
	<b>226</b>	-середина пров. слоя	
	<b>266</b>	-глуб. «фундамента»	

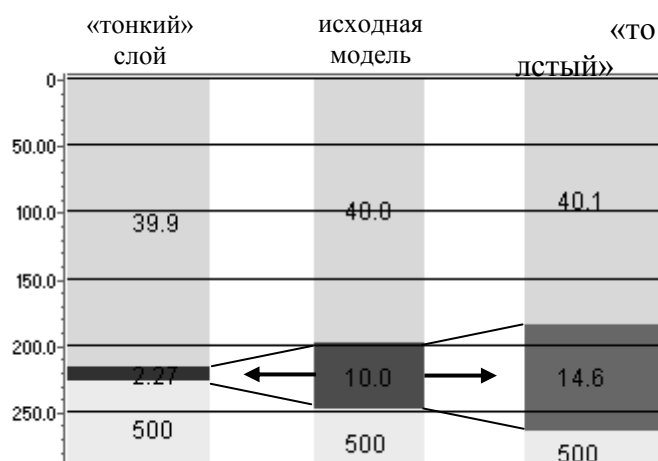
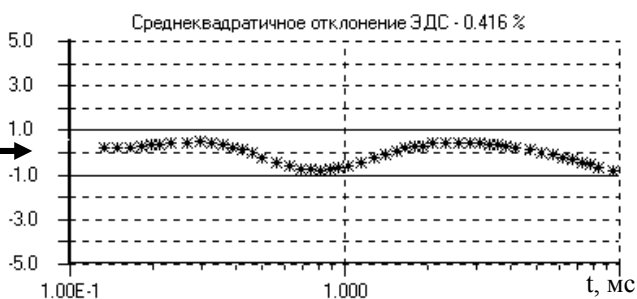


Рис 3.3. Иллюстрация S-эквивалентности: подбор альтернативных эквивалентных моделей в разрезе типа Н

Особо обращаем внимание читателя на рис 3.3., что во всех трех моделях *глубина залегания середины проводящего пласта практически не изменяется*, в то же самое время глубина до высокоомного основания разреза может варьироваться в пределах +6 / -10 %.

Ошибки определения значений продольной проводимости S-слоя лежат в пределах +10/-13 %. Для этого параметра подобные ошибки не являются значимыми, и можно считать, что *продольная проводимость и глубина середины S-слоя – это параметры, на которых эквивалентность отражается минимальным образом*. Именно на определение этих двух параметров и следует обращать внимание, в частности, ориентировать геологическую задачу.

Кроме того, перед интерпретацией следует изучить сопутствующие материалы, чтобы найти обоснование возможности закрепления мощности S-слоя.

**T-объекты, T-эквивалентность.** T-объект – это тонкий высокоомный слой. В методе ВЭЗ эти объекты характеризуются величиной поперечного сопротивления  $T = h \cdot \rho$ , в результатах зондирования проявляются ярко, и, в силу действия T-эквивалентности, при интерпретации мы можем получить разные  $h$  и  $\rho$ , удовлетворяющие условию  $T \approx \text{const}$

В ЗСБ ситуация иная, и мы лишь воспользовались из метода ВЭЗ обозначением тонкого высокоомного слоя.

Эквивалентность T-объектов в ЗСБ проявляется в том, что в результатах зондирования эти объекты проявляются слабо. И если в монотонных толщах на выделение такого объекта иногда есть какие-то надежды, то они «теряются» в случаях разрезов, кривые которых выглядят «информативно насыщенно».

Здесь уместно вспомнить имеющее в среде электроразведчиков справедливое суждение при сравнении особенностей ВЭЗ и ЗСБ: ВЭЗ хорошо выявляет T-объекты, ЗСБ хорошо выявляет S-объекты.

Когда мы имеем дело с S-объектом, характеризовать его «яркость» в данном разрезе принято величиной отношения его продольной проводимости к продольной проводимости перекрывающих отложений:  $\Delta S / S_p$ , где  $\Delta S$  - продольная проводимость S-объекта,  $S_p$  – перекрывающих отложений. Аналогичный показатель полезно использовать в случае T-объекта. В индуктивных методах не имеет смысла использовать величину поперечного сопротивления, здесь следует оперировать продольными проводимостями. Показателем «яркости» T-объекта может служить величина недостатка продольной проводимости, связанная с замещением части вмещающей среды высокоомным слоем, по отношению к продольной проводимости перекрывающей толщи. Представим себе однородную толщу с удельным сопротивлением 10 Ом·м. На глубине 100 м залегает высокоомный слой мощностью 20 м и сопротивлением 40 Ом·м. Если бы этот слой не был высокоомным, а имел также сопротивление 10 Ом·м, его продольная проводимость составляла бы  $20/10 = 2$  сименса. Фактически же этот слой имеет продольную проводимость  $20/40 = 0.5$  сименса. Т.е. превращение этого слоя из 10-омного в 40-омный вызвало «недостаток» продольной проводимости  $2 - 0.5 = 1.5$  сименса. Т.е. вычисление «недостатка» продольной проводимости проводится по формуле:

$$\Delta S_T = \Delta h / \rho_{\text{вм}} - \Delta h / \rho_T = \Delta h (1 / \rho_{\text{вм}} - 1 / \rho_T),$$

где  $\Delta h$  – толщина T-слоя,  $\rho_{\text{вм}}$  и  $\rho_T$  соответственно удельные сопротивления вмещающей толщи и T-слоя.

Этот слой перекрывается толщей с продольной проводимостью  $100/10 = 10$  сименс. Тогда *относительный «недостаток» продольной проводимости*, или, иными словами, *относительная контрастность T-слоя* составит  $1.5/10 = 0.15$ , в процентах – 15%. В общем случае формула вычисления относительной контрастности имеет вид:

$$\Delta S_T/S1 = \Delta h(1/\rho_{\text{вм}} - 1/\rho_T)/S1 = (1 - \rho_{\text{вм}}/\rho_T) \Delta h/h1,$$

где S1 и h1 – продольная проводимость и мощность перекрывающей тодщи.

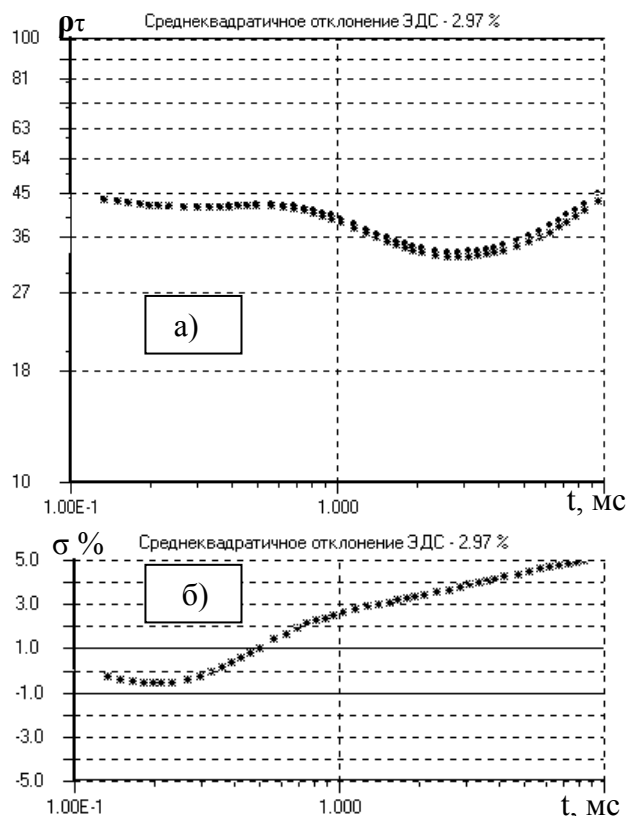
Рассмотрим конкретный пример проблемности выявления и параметризации Т-объекта. Исходный разрез типа КН, рассмотренный в примере с S-эквивалентностью, дополним Т-объектом толщиной 15 м на глубине 140 м (10% от глубины залегания) и удельным сопротивлением 100 Омм.

Таблица 3.3.

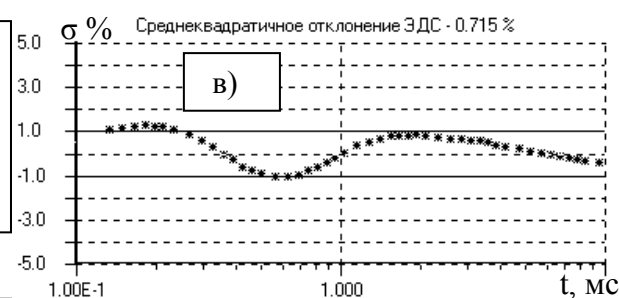
исходная модель, без Т-слоя			
I	$\rho_i$	$H_i$	$S_i$
1	40	200	5.0
2	10	50	5.0
3	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma}=10.0$
модель с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$H_i$	$S_i$
1	40	140	3.5
<b>2</b>	<b>100</b>	<b>15</b>	<b>0.05</b>
3	40	45	1.125
4	10	50	5.0



исходная модель, без Т-слоя			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	200	5.0
2	10	50	5.0
3	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 10$
модель с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	140	3.5
2	<b>100</b>	<b>15</b>	<b>0.15</b>
3	40	45	1.125
4	10	50	5.0
5	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.78$



инверсия в рамках модели типа Н			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40.2	207	5.15
2	9.28	44	4.74
3	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.89$



Инверсия в рамках модели типа Н со слоем ВЧР, т.е. типа КН			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	37.6	13.1	0.35
2	40.9	197	4.82
3	7.9	36.4	4.61
4	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.67$

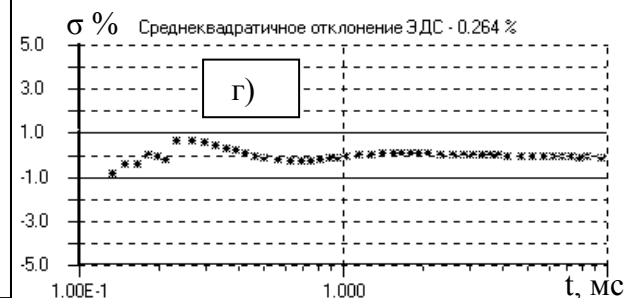


Рис 3.4. Иллюстрация проявления Т-эквивалентности. Пример первый  
В исходную модель типа Н (первая таблица) введен Т-слой (вторая таблица);  
а), б) –сравнение кривых с Т-слоем и без него;  
в) результат интерпретации псевдополевой (теоретической, с Т-слоем ) кривой в рамках модели типа Н;  
г) результат интерпретации в рамках усложненной модели, в которую введен дополнительный слой в верхней части разреза.  
Потребность введения Т-слоя не проявилась ни в виде кривых-трансформаций, ни при интерпретации: последний вариант интерпретации (тип КН) дополнительно «маскирует» проявление Т-слоя.

Относительный недостаток продольной проводимости («относительная контрастность объекта») в данном случае составит 6.4%:  $15(1/40 - 1/100)/(140/40) = 0.064$ .

На рис. 3.4. приведено сопоставление кривых кажущегося сопротивления и процентного расхождения значений эдс для исходного разреза и разреза с Т-слоем.

Появление Т-слоя приводит к монотонному, неяркому его проявлению в кривой зондирования. Анализ кривых STau, а также производных dS/dH также не дает явных проявлений Т-объекта. Остается одна надежда обнаружить это проявление – в процессе инверсии в рамках простой стартовой модели мы не сможем получить хорошее согласие псевдополевой и теоретической кривых, что потребует усложнения модели, т.е. введение Т-слоя. В качестве стартовой модели примем тип Н, поскольку принять более сложную модель пока нет оснований. Результат инверсии в рамках модели типа Н приведен на рис. в) и в третьей таблице. Среднеквадратическое расхождение на уровне 0.7%, рассогласование входит в доверительный коридор 1%. Незначительное превышение этого уровня имеется на начальных точках. На основе этого рассогласования усложняем модель введением в верхней части разреза дополнительного слоя. (на практике верхняя часть разреза, как правило, довольно изменчива в силу гидрогеологических условий, так что такое усложнение вполне естественно на практике). Результат интерпретации представлен на рис. г) и в четвертой таблице. Получено весьма хорошее согласие псевдополевой и теоретической кривых. Наличие Т-слоя мы не почувствовали, т.е. в данном случае метод не контролирует наличие Т-слоя. Попытки провести инверсию в рамках той же модели, в которой производился расчет прямой задачи приводили к положительному результату, если в стартовой модели параметры отличались от истинных не более, чем на 15-20 %. Однако последние эксперименты не следует серьезно использовать в выводах, поскольку расчет и инверсия незашумленных данных в рамках одной и той же модели выглядят некорректно.

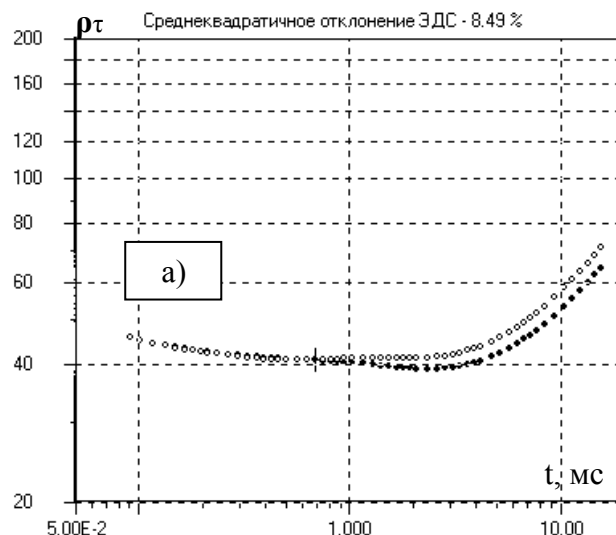
Рассмотренный неутешительный численный эксперимент требует рассмотрения ещё одного примера, более благоприятного. Результаты второго эксперимента приведены на рис 3.5. Представим себе двухслойный разрез с мощностью слоя 400 м и удельным сопротивлением 40 Ом·м. В середине этого слоя находится Т-слой мощностью 40 м и удельным сопротивлением 100 Ом·м. Эта ситуация отражена на рис. а) и соседних таблицах. Относительная контрастность Т-слоя в данном случае составляет  $(0.6/4.5)*100 = 13\%$ .

По внешнему виду кривых кажущегося сопротивления и продольной проводимости Т-слой себя не проявляет. С какой простейшей моделью мы приступим к интерпретации? С двухслойной. Пробная инверсия показывает, что модель требует усложнения. Трудно предположить, что толщина 400 м будет однородной. Разобьем её на два слоя и продолжим инверсию. Результаты представлены на рис. б). Среднеквадратическая «сигма» составляет 0.272 %, доверительный коридор входит в 0.6 %. Т.о. инверсия в рамках трехслойной модели должна вполне удовлетворить интерпретатора, поскольку формальных внутренних оснований для усложнения модели нет. Т-слоя в данных не видно, метод ЗСБ его не контролирует. Однако из сторонних материалов у интерпретатора может быть уверенность в наличии Т-слоя и с некоторой «натяжкой» можно согласиться с желанием использовать при инверсии 4х-слойную модель с Т-слоем. Один из результатов такой инверсии приведен на рис. в). При разумных отличиях в параметрах стартовой модели от истинных, при использовании разных вариантов автоматической инверсии практически всегда удавалось получить подобные решения, которые адекватно отражали исходную модель, в отличие от результатов первого примера. Для приближения эксперимента к натурным условиям псевдополевые данные были зашумлены.

Модель без Т-слоя			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	180	4.5
2	40	40	1
3	40	180	4.5
4	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 10$

Модель с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	180	4.5
2	100	40	0.4
3	40	180	4.5
4	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.4$



Интерпретация с моделью без Т-слоя			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	39.9	135	4.5
2	47.2	288	4.5
3	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.47$

Интерпретация с моделью с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	39.1	169.5	4.33
2	93	45.2	0.49
3	42	192	4.57
4	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.39$

Зашумленные данные, Интерпретация с моделью с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	39.9	154	3.85
2	181	22.4	0.12
3	40.6	212	5.22
4	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.2$

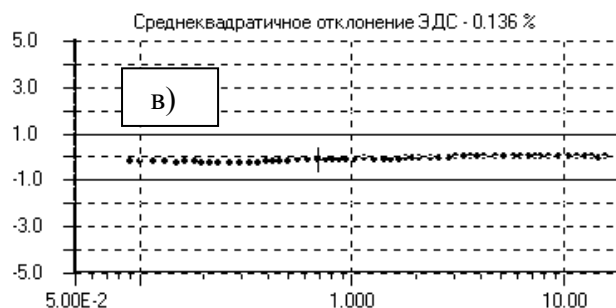
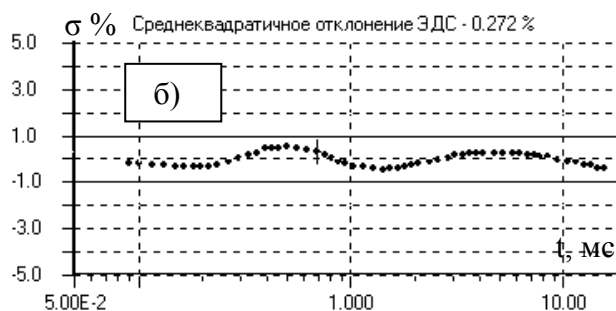


Рис. 3.5. Иллюстрация проявления Т-эквивалентности. Пример второй

а) В середину толстого однородного слоя двухслойной среды мощностью 400 м вставлен Т-слой, 40 м;

б) Инверсия в рамках трехслойной модели, без Т-слоя;

в) один из благоприятных вариантов инверсии в рамках 4-х слойной исходной модели, с Т-слоем;

г) «зашумленные» данные, один из благоприятных вариантов инверсии в рамках 4-х слойной исходной модели, с Т-слоем

Несколько слов нужно сказать об имитации погрешностей полевых измерений. Имитировать их рядом статистически независимых случайных чисел было бы неверным хотя бы уже потому, что данные, как правило, подвергаются сглаживанию на этапе предобработки. Кроме того, собственно аппаратурные погрешности также не носят случайно-статистический характер. С учетом этого мы и сформировали модель шума и ввели его в псевдополевые данные.

Пример результатов инверсии зашумленных данных с моделью, содержащей Т-слой, представлен на рис. г). Здесь мы видим, что несмотря на наличие шума результат инверсии адекватен исходной модели разреза. Более десятка инверсионных экспериментов с разными вариантами зашумления и стартовыми моделями сред позволили примерно в 50% случаев получить приемлемые результаты инверсии. *Конечно, точность параметризации Т-слоя была низка и под словом «приемлемые» нужно понимать задачу фиксации, обнаружения Т-объекта, а не его параметризацию.*

Положение сдвигалось в сторону улучшения точности параметризации при уменьшении сопротивления вмещающей среды. В этом случае, хотя продольная проводимость перекрывающих отложений возрастала, относительная контрастность Т-слоя оказывалась выше. При изменении  $\rho_1$  от 40 до 10 Омм контрастность возрастала от 13% до 20%. Это приводило к более благоприятным результатам параметризации Т-слоя.

На основе выполненных экспериментов складывается впечатление, что пороговая величина относительной контрастности Т-слоя в условиях благоприятного разреза находится на уровне 15-20% и более. Под благоприятными условиями понимается во-первых, монотонность вмещающей толщи, отсутствие в окружении заметных S-объектов, во-вторых, латеральная выдержанность, повторяемость результата инверсии на ряде пикетов, в третьих, надежная информация о наличии Т-объекта, его возможной относительной контрастности. Однако при этом нужно с вниманием относиться к возможной альтернативной инверсии, как в варианте б) на рис.3.5.

Не следует доверять незначительным перегибам на кривых STau, даже если вы наблюдаете их на ряде пикетов. Ищите дефекты в измерениях или обработке. Проверяйте свои соображения о моделях разреза с помощью моделирования.

Если в результатах инверсии многослойных разрезов вы получаете относительную контрастность Т-слоя меньше 10-15 %, рассматривайте целесообразность упрощения модели, с исключением этого слоя.

**Т-S-объекты, Т-S- эквивалентность.** В моделях разрезов, с которыми приходится сталкиваться на практике, которые иногда формируются на основе каротажных или иных геологических данных, возникают ситуации, когда рядом находятся Т- и S- слои. Либо когда ставится геологическая задача расчленения монотонной толщи на неконтрастные слои и определения удельных сопротивлений этих слоев. Опыт интерпретации показывает, что попытки решения таких задач зачастую приводят геофизика к проблеме эквивалентности и задача оказывается неразрешимой.

Рассмотрим сначала класс неконтрастных разрезов. Выше мы ввели характеристику , *относительной контрастности Т-слоя*, как относительный недостаток продольной проводимости Т-слоя с сопротивлением  $\rho_T$  и толщиной  $\Delta h$ , залегающего в однородной толще с сопротивлением  $\rho_{BM}$  на глубине  $h_1$  :

$$K_T = \Delta S/S_1 = \Delta h(1/\rho_{BM} - 1/\rho_T)/S_1 = (1 - \rho_{BM}/\rho_T) \Delta h/h_1.$$

Таким же образом можно ввести понятие «избыточной» продольной проводимости S-слоя:

$$\Delta S_S = - \Delta h / \rho_S - \Delta h / \rho_{BM} = \Delta h(1/\rho_S - 1/\rho_{BM}),$$

и относительного «избытка» продольной проводимости:

$$K_S = \Delta S_S / S_1 = \Delta h (1 / \rho_S - 1 / \rho_{BM}) / S_1 = (\rho_{BM} / \rho_S - 1) \Delta h / h_1.$$

Традиционно используемая в литературе характеристика «яркости» S-слоя как отношение полной продольной проводимости этого слоя к продольной проводимости перекрывающих отложений (которое мы, кстати, использовали в разделе S-эквивалентности), мало подходит к описанию слабоконтрастных разрезов, более того, введение новой характеристики контрастности S-слоя понадобилось для однотипного и физически адекватного описания неконтрастных T- и S- объектов.

Перейдем к конкретному примеру рассмотрения проявления в результатах зондирования T- и S-объектов с соразмеримой, невысокой степенью контрастности.

Во первых, читателю будет полезно ознакомиться с явлением компенсации проявления близко расположенных слабоконтрастных T и S –слоев. Иллюстрация этого эффекта приведена на рис. 3.6. За основу мы взяли тот же разрез, что и при рассмотрении второго примера T-эквивалентности (рис. 3.5.). Эта фоновая модель приведена в первой таблице рис. 3.6., где выделенные второй и третий слои предназначены для формирования T и S слоев. Рисунки б) и в) и соответствующие им модели в соседних таблицах показывают отдельное проявление T и S слоев. Контрастности T и S –слоев выбраны одинаковыми, равными 13%. Характер проявления в графиках б) и в) выглядят инверсно-одинаковыми, если учесть их разную глубину залегания. Совместное проявление T и S –слоев – рисунок г) – значительно слабее, что и отражает эффект компенсации.

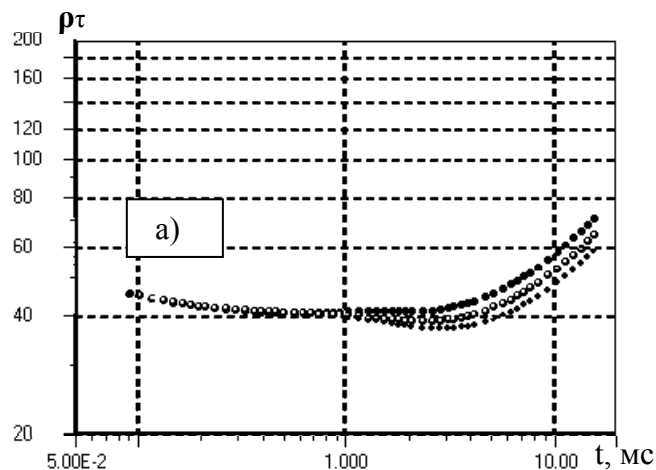
Перейдем к экспериментам по интерпретации кривой зондирования, содержащей T—S- объект. Основные результаты этих экспериментов приведены на рис 3.7.

Попытка инверсии с двухслойной стартовой моделью не приводят к удовлетворительным результатам. Значение «сигма» не снижается менее 5-6%, на кривых кажущегося сопротивления визуально видны различия псевдополевой и теоретической кривых. Усложняем модель, используем трехслойную модель, т.е. разбиваем надпорную толщу на два слоя. Результат инверсии – на рис. а). В рамках этой модели получено хорошее совпадение псевдополевой и теоретической кривых, доверительный коридор – менее 1%. Значимых формальных оснований для усложнения модели инверсии уже на этом этапе нет. Практически мы не контролируем наличия или отсутствия TS –объекта.

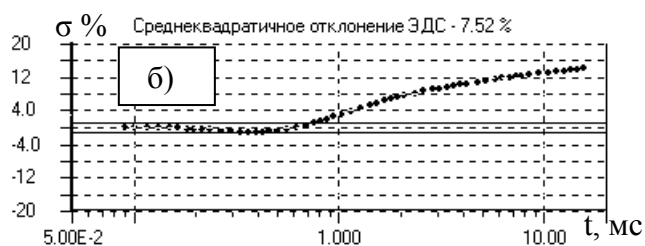
Дальнейший шаг – принятие в качестве стартовой модели четырехслойного разреза – «осадочная» толща разбита на три слоя. Результаты инверсии – на рис б), в) и соответствующих им таблицах. Два варианта инверсии соответствуют двум вариантам набора параметров стартовой модели. В обеих моделях неустойчивый набор параметров, хотя просматривается неконтрастный разрез типа КН. Если использовать этот признак как сигнал о возможном наличии TS-объекта, то такой прием будет очень хитрым. Среднеквадратические значения «сигма» – 0.22% и 0.16%. доверительный коридор – менее 0.5%. После сравнения с ситуацией предыдущего случая становится очевидным, что диагностировать наличие в разрезе TS-объекта мы действительно не можем.

Представим все же маловероятную ситуацию, что мы имеем надежные подробные сведения о разрезе, которые позволяют нам зафиксировать модель разреза (с TS-объектом) и его геометрию. Если мы просто выполним эти условия и проведем инверсию, то программа почти всегда выходит на практически точное решение. Но это свидетельствует лишь об удачных алгоритмах и отсутствии ошибок и небрежностей в программе. Чтобы приблизить ситуацию к реальной, нужно внести погрешности в псевдополевые данные и в геометрические параметры разреза. Результаты этих экспериментов – на рис. г), д) и соответствующих таблицах. При инверсии мы закрепляли геометрические параметры (с внесенными погрешностями  $h_i$  менее 10%) и варьировали

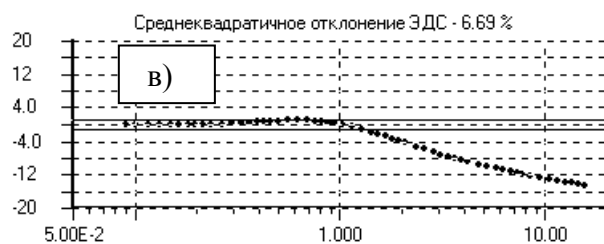
Фоновая модель среды			
i	$\rho_i$	$h_i$	Si
1	40	180	4.5
2	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>1</b>
3	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>1</b>
4	40	140	3.5
5	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 10$



Модель с Т-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	Si
1	40	180	4.5
2	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>0.4</b>
3	40	40	1
4	40	140	3.5
5	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 9.4$



Модель с S-слоем			
i	$\rho_i$	$h_i$	Si
1	40	180	4.5
2	40	40	1
3	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>1.6</b>
4	40	140	3.5
5	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 10.6$



Модель с TS-объектом			
i	$\rho_i$	$h_i$	Si
1	40	180	4.5
2	<b>100</b>	<b>40</b>	<b>0.4</b>
3	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>1.6</b>
4	40	140	3.5
5	$\infty$	$\infty$	$S_{\Sigma} = 10$

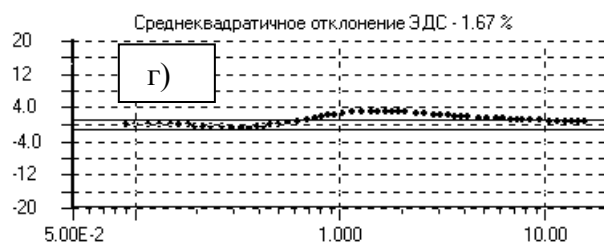


Рис. 3.6. Эффект компенсации откликов в TS-объекте

- а) Кривая фоновой модели среды(средняя) и кривые с Т-слоем и S-слоем;
- б) График проявления Т-слоя;
- в) График проявления S-слоя;
- г) График проявления TS-объекта.

TS-объект малой контрастности проявляется значительно слабее, чем каждый из слоев.

Модели  
и результаты интерпретации

Трехслойная модель  
(надпорная толща – два слоя)

i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	39.9	88.5	2.22
2	41.5	327	7.88
3	$\infty$	$H_\Sigma=415$	$S_\Sigma=10.1$

Четырехслойная модель  
(надпорная толща – три слоя)

i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40.1	162	4.04
2	47.6	84.2	1.77
3	34.5	144	4.17
4	$\infty$	$H_\Sigma=390$	$S_\Sigma=9.98$

То же

i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40.1	150.2	3.75
2	49.1	55.8	1.14
3	37.7	194	5.15
5	$\infty$	$H_\Sigma=400$	$S_\Sigma=10.04$

Пятислойная модель,  
инверсия значений  $\rho_i$ ,  
шумы в данных, шумы в  $h_i$

i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	190	4.75
2	75	37	0.49
3	27	44	1.63
4	44.8	145	3.24
5	$\infty$	$\infty$	$S_\Sigma=10.1$

То же

i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	39.9	170	4.26
2	52	44	0.85
3	41.9	36	0.86
4	33.6	135	4.02
5	$\infty$	$\infty$	$S_\Sigma=9.99$

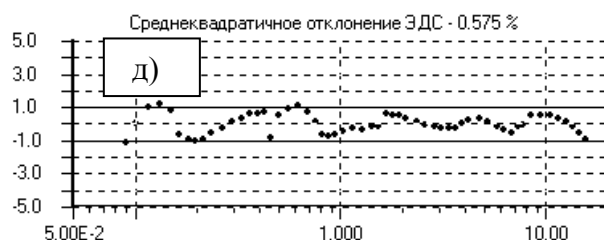
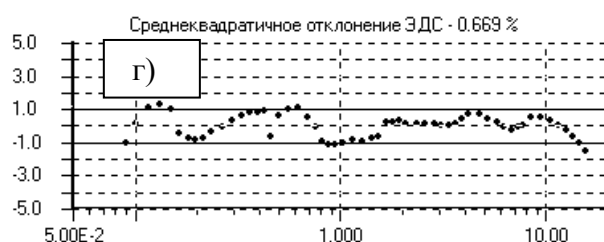
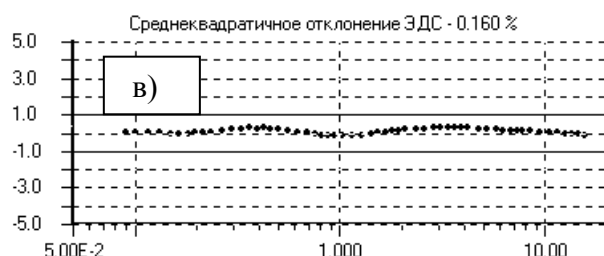
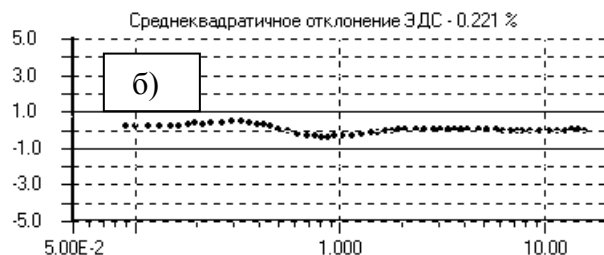
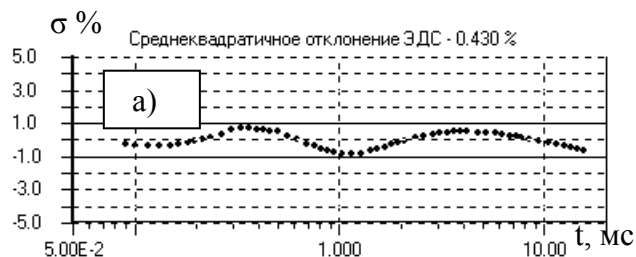


Рис 3.7. Иллюстрация проявления TS-эквивалентности

Исходная модель с TS-объектом – в таблице на рис. 3.6.

- а) – результат инверсии в рамках трехслойной модели;
- б) – результаты инверсии в рамках четырехслойной модели, с разными стартовыми значениями параметров;
- в) – инверсия значений  $\rho_i$  с 5-слойным разрезом, с шумами в данных и в толщине слоев.

удельными сопротивлениями. Представленные два типичных результата инверсии показывают, что в модели г) просматривается TS-объект, а в модели д) – нет. Рассмотренный пример позволяет утверждать, что в подобной геоэлектрической ситуации задача обнаружения, и тем более параметризации Т – S –объекта – задача нереальная.

Если же Т и S объекты по контрастности окажутся неравными, несбалансированными, то можно прогнозировать надежду выявления объекта более контрастного и «пропадание» менее контрастного, в рамках тех возможностей, которые были рассмотрены в предыдущих разделах для Т или S –объектов, в зависимости от того, какой объект окажется более «ярким». Более вероятными шансами обладают, конечно, S – объекты, как обладающие более широким диапазоном контрастности.

**Два близких S-слоя.** Известна проблема разделения двух близкорасположенных S-слоев. Вариантов ситуаций великое множество и дать обобщимую характеристику «решаемости и нерешаемости» задачи разделения вряд ли возможно. Даже в случае простейшей ситуации с вмещающей средой – однородной – задача классификации ситуаций весьма обширна и выходит за рамки нашего краткого изложения. Моделирование конкретных ситуаций – как мы делали это в предыдущих примерах – наиболее реальный путь оценки возможностей ЗСБ и выявления возможных «ловушек» в деле интерпретации.

Следуя нашей манере выбора примеров, рассмотрим ситуацию, в которой подчеркивается сложность решения задачи разделения и прогноза проявления объектов в разрезе на основе физических соображений. Представим себе двухслойный разрез с глубиной до высокоомного основания 400 м и удельным сопротивлением надпорной толщи 40 Ом·м. В разрезе на глубине 200 м и 300 м залегают 2 проводящих слоя невысокой контрастности:

Таблица 3.4

i	Pi	hi	Si
1	40	200	5.0
<b>2</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>2.0</b>
3	40	80	2.0
<b>4</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>2.0</b>
5	40	80	2.0
6	$\infty$	H <sub>Σ</sub> =400	S <sub>Σ</sub> =13.0

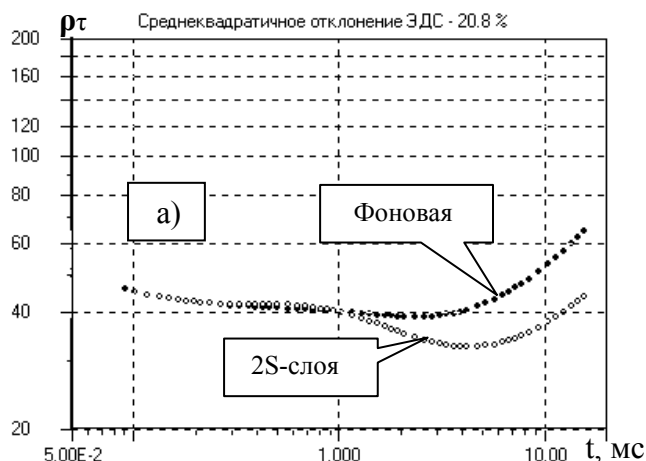
Продольная проводимость двух S-слоев составляет более 30% от суммарной продольной проводимости разреза.

Результаты анализа по этой модели приведены на рис. 3.8. По внешнему виду кривых  $\rho_t$  и  $\sigma_t$  и их производных раздельного проявления слоев не видно, кривая имеет вид типа Н. Результат инверсии кривой в рамках модели типа Н приведена во второй таблице и рис. б). Получен доверительный коридор на уровне 0.5%, среднеквадратическое значение расхождения 0.24%. Оснований для дальнейшего усложнения модели разреза нет. Аномалия «рассогласования» (на графике «сигма») – не более 1 %. Она легко «потеряется» на уровне реальных погрешностей измерений. В данном случае разделение S-слоев практически нереально.

Понятно, что если эти S-слои будут более «яркими», шансы на их разделение повысятся. Рассмотрим такую более благоприятную модель, где продольная проводимость S-слоев в два раза выше:



Модели: Исходная (2 S-слоя) / фоновая			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	200	5.0
2	10/40	20	2.0/0.5
3	40	80	2.0
4	10/40	20	2.0/0.5
5	40	80	2.0
6	$\infty$	$H_\Sigma=400$	$S_\Sigma=13.0/10$



Результат инверсии в рамках модели типа Н			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40.1	172	4.24
2	23.6	204	8.61
3	$\infty$	$H_\Sigma=376$	$S_\Sigma=12.85$

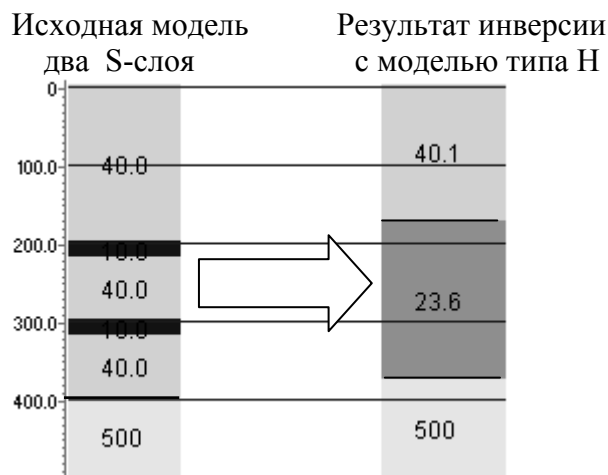
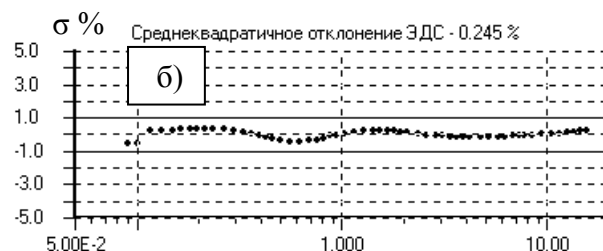


Рис. 3.8. Иллюстрация проявления эквивалентности в модели с двумя S-слоями

#### Пример первый

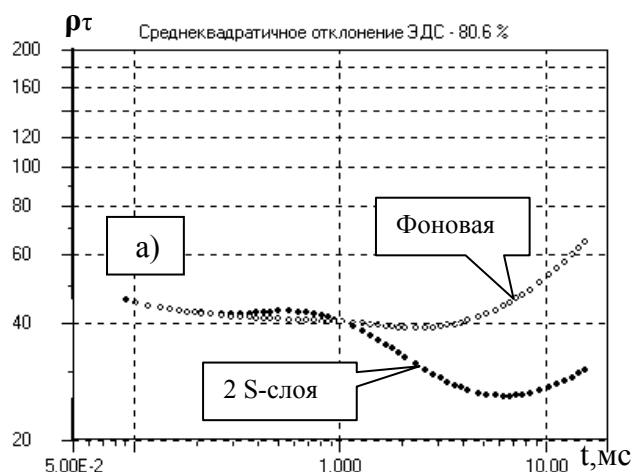
а) Исходная модель с двумя S-слоями и её фоновая модель (в таблице), кривые  $\rho\tau$  исходной модели, и фоновой моделей разреза;

б) Результат инверсии в рамках модели типа Н– параметры модели (в таблице) и график разности эдс.

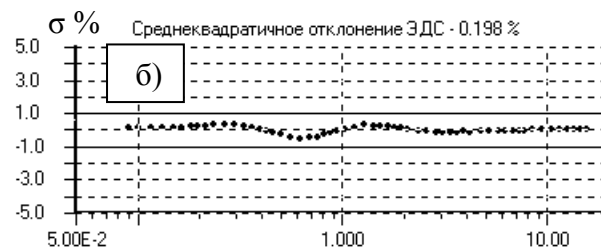
Вклад, вносимый в становление двумя S-слоями – ощутимый (см. кривые  $\rho\tau$ ). Однако, инверсия с моделью типа Н уже дает хорошее согласие полевой и модельной кривых. Разделение S-слоев проблематично.



Модели: Исходная (2 S-слоя) / фоновая			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40	200	5.0
2	5/40	20	4.0/0.5
3	40	80	2.0
4	5/40	20	4.0/0.5
5	40	80	2.0
6	$\infty$	$H_\Sigma=400$	$S_\Sigma=17.0/10$



Результат инверсии в рамках модели типа НА			
i	$\rho_i$	$h_i$	$S_i$
1	40.04	194.8	4.86
2	4.23	8.0	1.9
3	16.8	172	10.24
4	$\infty$	$H_\Sigma=374$	$S_\Sigma=17.0$



Исходная модель      Результат инверсии  
два S-слоя      с одним S-слоем (модель НА)

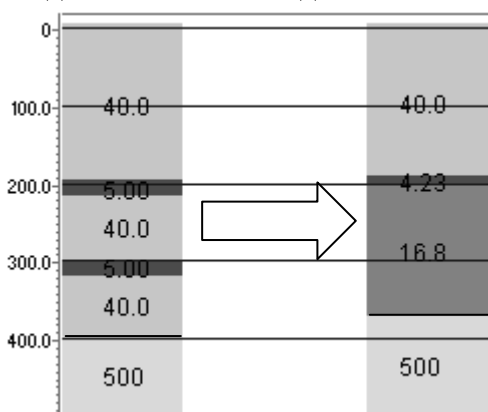


Рис. 3.9. Иллюстрация проявления эквивалентности в модели с двумя S-слоями  
(второй пример)

- а) Кривые  $\rho\tau$  исходной (с двумя S-слоями) и фоновой моделей разреза;  
б) Результат инверсии в рамках модели с одним S-слоем – параметры модели (в таблице) и график разности эдс.

Разделение двух слоев весьма проблематично, полученная модель разреза слабо напоминает исходную в значимых чертах – не произошло простого слияния двух слоев в один.

Таблица 3.5

i	Pi	Hi	Si
1	40	200	5.0
<b>2</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>4.0</b>
3	40	80	2.0
<b>4</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>4.0</b>
5	40	80	2.0
6	$\infty$	$H_{\Sigma}=400$	$S_{\Sigma}=17.0$

В этой модели продольная проводимость двух S-слоев составляет уже почти 50% от суммарной продольной проводимости разреза. Результаты исследований с этим разрезом представлены на рис. 3.9. Как видно из рис. 3.9. а), понижение сопротивлений в пределах слоев-объектов весьма сильно проявляется в результатах зондирования. Хотя кривые внешне выглядят как типа Н, интерпретация в модели типа Н даже на визуальном уровне не дает приемлемого совпадения кривых кажущегося сопротивления. Представление надпорной толщи в виде трех слоев (средний из которых должен был бы аккумулировать два проводящих слоя исходной модели), устойчиво приводят при инверсии к результату, представленному на рис. б) и соответствующей таблице. Полученный разрез типа НА дает доверительный коридор на уровне 0.5%, среднеквадратическое значение расхождения 0.2%. Как и в предыдущем случае, оснований для дальнейшего усложнения модели разреза нет. Аномалия «рассогласования» (на графике «сигма») – не более 1 %. Она легко «потеряется» на уровне реальных погрешностей измерений. В данном случае разделение S-слоев также практически проблематично.

Представим себе, что мы столкнулись в реальной ситуации с исходным разрезом, содержащим 2 S-слоя, получили реально «зашумленную» кривую зондирования, и у нас есть информация о том, что разрез имеет именно исходный тип модели, содержащей 2 S-слоя. Мы сформируем такую модель, естественно, с определенными погрешностями в геометрии и сопротивлениях. Мы выполнили эти условия и провели ряд сеансов инверсии как с закреплением геометрических параметров, так и с их варьированием. Даже без всякого зашумления данных ЭДС получаемые результаты инверсии в значительной мере зависели от стартовых параметров модели и используемых программ инверсии. При закреплении геометрических параметров получаемые значения сопротивлений могли существенно отличаться от истинных, хотя главные черты модели – наличие двух проводящих слоев - сохранялись. При варьировании всех параметров иногда приходили к результату, который с геолого-геофизических позиций имел принципиально значимые отличия от исходной модели. Приемлемыми оказывались лишь суммарные параметры разреза.

Итак, мы рассмотрели лишь ситуации, в которых разделение двух S-слоев оказалось проблематичным. В предыдущих разделах мы достаточно подробно изложили основные моменты моделирования при исследовании проблем эквивалентности. Думаем, что пользователи системы Подбор смогут пробовать такие исследования вести самостоятельно.

**Ранние времена регистрации и минимальная глубина расчленения.** Наряду с проблемами эквивалентности, связанными с выбором модели разреза и с погрешностями измерений, которые мы рассмотрели выше, существует источник эквивалентности, связанный с ограниченным диапазоном времен, в котором измерена полевая кривая зондирования.

Неискаженной регистрации сигнала на ранних временах препятствует влияние фронта выключения тока, инерционные свойства приемника и ограниченный диапазон максимально измеряемого сигнала. На поздних временах сигнал быстро убывает и уходит

за пределы уровня шума. Фактическому диапазону времен, в котором достоверно зарегистрирован процесс становления, соответствует диапазон глубин, в рамках которого мы вправе надеяться на достоверное (в пределах эквивалентности) определение параметров разреза. Если мы будем пытаться определить параметры слоев, выходящих за этот диапазон глубин, мы неизбежно столкнемся с проблемой эквивалентности. Определить диапазон глубин, соответствующий диапазону времен регистрации сигнала, можно по кривой  $STau(HTau)$ , расчет которой предусмотрен как в Подборе, так и в ПРОБЕ, на этапе подготовки данных. Можно также воспользоваться понятием скин-слоя, на основе которого введено понятие эффективной текущей глубины:

$$H_{эф} \approx 800 (\rho t)^{1/2},$$

где вместо  $\rho$  используется значение кажущегося сопротивления.

Обе оценки дают близкие значения связи текущего времени и текущей глубины зондирования.

Рассмотрим типовую ситуацию, когда из полевых измерений выпадают ранние времена регистрации. Как это может отразиться на параметризации верхней части разреза?

Представим себе, что мы исследуем осадочный разрез мощностью около 200 м и применяем установку зондирования 100x100 м. Используя режимы измерений с малым и большим током нетрудно на этой установке обеспечить регистрацию процесса с 15-20 мкс. В то же время фактор времени зачастую требует предельного сокращения затрат времени на процесс измерения. В этом случае, ограничившись одним режимом измерения, мы будем регистрировать переходный процесс, например, со 100 мкс.

Обратимся к рис. 3.10. В окне кривых  $RoTau$  и  $STau$  приведены кривые для двух моделей разреза, описанных рядом в соответствующих таблицах. Замена верхней 10-метровой части «фоновой» разреза типа Н на проводящий слой (модель Bitum-2) приводит к заметному различию в кривых. Это различие простирается до первых миллисекунд для  $RoTau$  и до сотни метров в кривых  $STau(HTau)$ . Кривые приведены с времени 15 мкс, на них также отмечено время 100 мкс. На кривых  $STau(HTau)$  это соответствует начальной глубине 20 м и 53 м.

Представим себе, что кривая модели Bitum-2 с проводящим верхним слоем является полевой кривой с начальным временем 100 мкс.

Попытка инверсии этой кривой в рамках упрощенной модели типа Н не приводит к успеху – среднеквадратическая невязка не снижается меньше уровня 4%, различие очевидно на визуальном уровне сопоставления кривых  $RoTau$ . Таким образом, *проигнорировать наличие проводящего слоя в верхней части разреза невозможно.*

Далее выполним инверсию с моделью КН, т.е. с проводящим слоем сверху. Чтобы понять, каков реальный диапазон возможных вариаций параметров верхнего слоя, инверсию осуществим с разными вариантами закреплённой толщины верхнего проводящего слоя. На рисунке 3.10. в нижних таблицах приведены результаты инверсий с толщиной верхнего слоя 2 и 30 м. Оба варианта дают неплохие значения невязки (0.13% и 0.33%). На уровне графического сопоставления кривых  $RoTau$  и  $STau(HTau)$  различия не видно. Однако параметры первого слоя по продольной проводимости (не говоря уже о сопротивлении) заметно отличаются от исходной (0.33 и 1.53 сименса вместо 0.67). Т.е. в данном случае хотя мы и контролируем **наличие** проводящего слоя, достоверность его параметризации невысока.

Обратим внимание, что сейчас мы рассматривали модель с невысокой избыточной продольной проводимостью верхнего слоя. Если увеличить его продольную проводимость в 3 раза, т.е. положить в модели Bitum-2 сопротивление первого слоя 5 Ом (см. рис. 3.10), то картина с возможностью параметризации первого слоя становится более

обнадеживающей. С теми же критериями приемлемой невязки при инверсии мы получим диапазон возможных мощностей первого слоя от 8 до 13 м, при этом диапазон его продольных проводимостей – от 1.8 до 2.2 сименс. Т.е. в этом случае мы достаточно надежно контролируем параметры верхнего слоя, хотя начальная глубина зондирования при этих параметрах разреза, по оценкам кривой  $STau(HTau)$ , составляет 35 м, т.е. больше реальной мощности первого слоя в 3 раза.

Таким образом, в полученных результатах моделирования просматривается важный вывод. Если практическая кривая зондирования получена с времени  $t_{min}$ , соответствующему минимальной текущей глубине зондирования  $h_{min}$ , то это не значит, что мы потеряли информацию о верхней части разреза  $h < h_{min}$ . Более того, если в этой «закрытой» зоне имеется достаточно «яркий» проводящий слой, можно надеяться на определение его параметров. При этом, конечно, не может идти речи о каком-то дополнительном расчленении разреза в «закрытой» зоне глубин, речь идет о некотором обобщающем низкоомном (либо высокоомном?) слое, несущем интегральную характеристику «закрытой» зоны глубин.

В рамках рассмотренной темы ранних времен регистрации и соответствующих особенностей интерпретации нельзя не упомянуть об одном эффекте, связанном с некорректной регистрацией ранних времен переходного процесса. Речь идет о влиянии фронта выключения тока, инерционности приемного датчика, ограниченности полосы пропускания измерительного канала. Если диаграмму выключения тока в Подборе можно ввести в файл описания тока и этим учесть её в интерпретации (что требует специальных методических приемов и выполняется далеко не всегда), влияние остальных элементов часто не контролируется, но отражается в измеренном сигнале и приводит к соответствующим погрешностям. В технологии работы с электроразведочной системой ЦИКЛ предусмотрены соответствующие меры коррекции сигнала, которые устраняют значительную долю искажений, однако в общем случае следует признать возможность наличия в результатах измерений обсуждаемых погрешностей. Эти «остаточные» погрешности носят характер сдвига сигнала по времени, как правило, в сторону запаздывания. Мы сталкиваемся с такими «сдвигами» как при малоглубинных зондированиях, при регистрации сигналов с 10 – 30 мкс на установках 50х50 м, так и при глубинных зондированиях, в нефтепоисковых приложениях, при регистрации сигналов с 2-5 мс, на установках 1х1 км. Эти «остаточные» погрешности сдвига не отражаются на кривых  $STau(HTau)$ , однако при интерпретации в Подборе могут изменить истинную картину параметров ВЧР. В частности, при наличии запаздывания сигнала (величина сигнала на ранних временах становится больше, значения  $RoTau$  – меньше) появляется тенденция к занижению значений сопротивлений верхних слоев разреза, получаемого при инверсии. Если же исходный разрез в верхней части является однородным, то появление указанных погрешностей требует введения в модель низкоомного верхнего слоя. Этот эффект более ярко проявляется при исследовании высокоомных разрезов.

Представляем читателю возможность самостоятельно промоделировать описанную ситуацию. Рассчитайте в Подборе и сохраните теоретическую кривую становления («сохранить файл данных с расчетной ЭДС»), с помощью программы ПРОБА введите в сигнал сдвиг по времени, затем полученную псевдополевую кривую проинтерпретируйте в Подборе.

**Выводы, или чем завершить изложение проблем эквивалентности?** В изложенном выше разделе мы на самом деле только «прикоснулись» к проблеме эквивалентности. И не завершили изложения этого вопроса в данной работе, поскольку ниже будем возвращаться к нему неоднократно. Рассмотренные примеры проиллюстрировали лишь некоторые аспекты проблемы, притом подбор примеров носил некоторый пессимистический оттенок. Не менее важной, на наш взгляд, задачей являлась иллюстрация методологии

исследования вопросов эквивалентности с использованием инструментария, заложенного в программном комплексе Подбор. Это, надеемся, позволит пользователям самостоятельно решать проблему в рамках конкретных ситуаций.

Кроме того, как нам показалось, нам удалось продемонстрировать двоякую природу эквивалентности, где с одной стороны, проблема связана с неопределенностью выбора модели, в рамках которой ведется инверсия, с другой стороны – с погрешностью экспериментальных данных в рамках каждой используемой модели.

В вопросе модельной эквивалентности мы широко использовали «принцип Оккама», в соответствии с которым среди ряда моделей, в рамках которых мы можем получить приемлемую величину невязки, предпочтение следует отдавать наиболее простой модели, или если мы получаем с какой-то моделью приемлемую величину невязки, то оснований для усложнения модели нет.

Итак, какую же итоговую рекомендацию можно предложить пользователю для выявления и борьбы с эквивалентностью в практической работе?

Если вы начинаете работу с новым материалом, новой площадью, то на начальном этапе, после формирования стартовой модели и проведения инверсий на ряде пикетов, целесообразно проработать следующие вопросы.

- оценка на эквивалентность; при этом исследованию подвергнуть те параметры (или группы параметров), которые значимы для геологических заключений;
- оценка возможности упрощения или усложнения модели разреза;
- оценка возможности закрепления тех или иных параметров;
- выбор параметра или группы параметров, которые более надежны в плане характеристики геологической задачи.

Исследования на эквивалентность параметра, или возможный диапазон его изменения производят следующим образом. После первичной инверсии значение параметра изменяется в ту или иную сторону, производится инверсия с закрепленной величиной исследуемого параметра. Процедура производится при нескольких значениях параметра. Для каждой процедуры запоминается полученная величина «сигма». Из полученных вариантов повторной инверсии выбираются те, при которых «сигма» незначительно (на 20-30%) отличается от полученной в первичной инверсии. Выбранные варианты и имеют приемлемый диапазон изменений исследуемого параметра.

В вопросе упрощения или усложнения модели нужно опираться на анализ и соответствие получаемой невязки и качества полевого материала. При хорошем качестве полевого материала кривые  $Ro\tau$  и  $STau(H\tau)$  выглядят «гладкими», можно добиться хорошего графического совпадения кривых (различие практически неразлично) невязка «сигма» при этом - на уровне 0.7-1.5 %. Если вы получаете 2 – 3 % - это признак возможности усложнения модели. В решении этого вопроса помогает также анализ графика процентного расхождения «разность».

В вопросе закрепления тех или иных параметров речь чаще идет о геометрических параметрах, например, мощностях слоев. При этом не следует «перегибать палку» по их количеству, поскольку реальные ошибки в закрепляемых параметрах могут вызвать «геометрическую» несогласованность реальной и теоретической модели.

И, наконец, о выборе информационного параметра. Для пояснения – пример из недавней практики. Известно, что битумная залежь формируется в пределах проводящего слоя (разрез типа Н) мощностью 30 – 50 м на глубине 150-170 м. Контрастность проводящего слоя невысока, налицо проявление S-эквивалентности. Залежь может проявляться в структурном плане по кровле проводящего слоя, в слое может появляться линза относительно высокоомного песчаника с битумным насыщением. Возможны иные латеральные эффекты по удельному сопротивлению этой толщ. Аномальные эффекты малы, на уровне 10-15 % от суммарных параметров. В условиях проявления S-эквивалентности по нижнему проводящему слою наиболее устойчиво определяются его

продольная проводимость и глубина залегания середины пласта. В этом случае мы не можем надеяться на выявление залежи по структурному фактору по глубине до кровли, либо глубине до подошвы низкоомного пласта, либо по изменению его удельного сопротивления.. Возможные критерии проявления залежи следует искать в рамках устойчивых к определению параметров, главным образом – в продольной проводимости нижнего проводящего слоя.

В заключение раздела немного оптимизма. Практика интерпретации материалов различных регионов показывает, что нередко удается получить устойчивые, с непринципиальной эквивалентностью результаты инверсии в рамках моделей с шестью-восемью слоями. Это, безусловно, касается случаев «благоприятных» разрезов, характеристика которых дана в «предварительных замечаниях» настоящей главы.

### 3.1.3 Стартовая модель среды

Рассмотрение проблемы эквивалентности неизбежно приводит к одному из важнейших вопросов численной инверсии – выбору стартовой модели среды, в рамках которой будет решаться обратная задача. Этот вопрос встает, как правило, при начале анализа материала на новом участке работ, либо, естественно, при освоении методики численной инверсии.

Если Вы примете слишком упрощенный вариант модели, Можно не получить хорошей согласованности полевой и теоретической кривых. Если же модель неоправданно усложнена, будет слишком велико число определяемых параметров (много степеней свободы), и Вы рискуете оказаться во власти эквивалентности. Третий аспект этой ситуации состоит в том, что существенные, невторостепенные черты строения георазреза должны находить отражение в поставленной геологической задаче. Отсюда проблема упрощения или усложнения модели зачастую напоминает балансирование на грани «допустимое-недопустимое». В помощь решения этой проблемы выступает так называемый «Принцип Оккама», который для нашего случая означает, что в формировании модели следует стремиться к минимальному числу слоев, описывающих основные черты георазреза. Это же требование вытекает из соображений минимизации неизбежного действия принципа эквивалентности.

Сразу следует отметить, что в Подборе нет узкоспециальных процедур или трансформант, специально предназначенных для разработки стартовых моделей, поэтому в этом вопросе следует привлекать традиционные трансформанты RoTau, STau(HTau).

В подходе к выбору стартовой модели возможны две ситуации. Имеются ли какие-либо априорные сведения (как правило, каротажные) о геоэлектрических характеристиках разреза, или не имеются. Вторая ситуация сложна, но не безнадежна. В ней используется пара подходов.

ИМЕЮТСЯ ДАННЫЕ ПО СКВАЖИНАМ	ДАННЫЕ ПО СКВАЖИНАМ ОТСУТСТВУЮТ	
Для формирования стартовой модели используются данные каротажа, литологическое описание пород.	Строим модель на основе анализа кривых - трансформант, уточняем после пробных инверсий.	Строим «пробную» модель с нарастающей толщиной слоев, инверсией уточняем уд. сопротивления слоев, затем – их толщину.

**Рассмотрим первую ситуацию.** Например, достаточно часто выполнен стандартный каротаж КС, либо БКЗ. Поэтому при формировании исходной модели среды



можно опираться и на каротажные диаграммы, пересчитанные в графики  $S(H)$  а также на анализ формы кривых  $RoTau$ ,  $STau(HTau)$ .

Анализ совокупности этих данных позволяет выявить основные, наиболее существенные черты строения геоэлектрического разреза, которые могут быть положены в основу исходной модели для интерпретации.

Необходимо заметить, что каротажные данные стандартного каротажа не являются «истиной в последней инстанции». Во-первых, наиболее распространенный каротаж КС оперирует кажущимися параметрами, полученными с фиксированной геометрией установки в режиме профилирования. Переход к истинным значениям сопротивления пласта здесь невозможен. Да и цели этого каротажа несколько иные. Кроме того, неоднородное и разнообразное взаимодействие бурового раствора с породами, пластовыми водами, отражение в каротажных данных механических свойств, усложняют общую картину. Таким образом, каротажные диаграммы КС дают надежную информацию о возможных границах изменения свойств пород, в том числе электрических, и менее надежную об удельных сопротивлениях. Каротаж БКЗ выполняется значительно реже, хотя он дает более надежные результаты по удельным сопротивлениям. В то же время, как и всякий каротаж, он не свободен от некоторых проблем, упомянутых выше.

Как правило, полученные таким образом модели обладают *завышенной подробностью*, их можно рассматривать как первое приближение к стартовой модели. Кроме того, суммарная продольная проводимость разреза по каротажу и по практическим кривым  $STau(HTau)$  могут существенно различаться, что требует первичной корректировки стартовой модели для соответствия её практической кривой. Первые же результаты интерпретации требуют проверок на эквивалентность, проверок на возможность упрощения модели.

**Вторая ситуация**, с отсутствием у геофизика предварительной информации о геоэлектрических характеристиках разреза, встречается также нередко, особенно при постановке электроразведки в новых районах.

В этом случае можно поступить двояко.

Первый путь – если кривые «недлинные», имеют простой «классический» вид, попытаться на основе анализа трансформант  $RoTau$  и  $STau(HTau)$  сформировать простейшую модель, обращая внимание на соответствие её диапазону глубин кривой  $STau(HTau)$ . Далее, с помощью «ручной» редакции параметров слоев добейтесь примерной графической согласованности полевой и теоретической кривых. Затем включайте автоматическую инверсию. В случае с проблемами получения малых значений невязки попытайтесь усложнить разрез, вставив дополнительный слой, либо разбив толстый слой на два слоя. В дальнейших действиях опирайтесь на свой опыт. Если его не хватает – набирайтесь, пробуйте.

Второй путь используем в случае, если вы затрудняетесь сформировать представление о модели разреза, кривые – трансформанты невыразительны, монотонны. Задайте 5-7 слоев, мощность которых увеличивается с глубиной, например, с коэффициентом 1.3 – 1.5. Мощность верхнего слоя задайте меньше начальной глубины зондирования по  $STau(HTau)$ . Суммарная мощность модели должна отражать максимальную глубину зондирования (скорее, должна быть меньше её). Сопротивления слоев и сопротивление основания выберете в соответствии с кривой  $RoTau$ . Сначала вручную, а затем в автоматическом режиме варьируйте сначала значениями сопротивлений, а потом и мощности. Если Вы наблюдаете, что полевая и теоретическая кривые имеют на отдельных участках расхождения, превышающие погрешности измерения, усложните среду (введите новый слой) в том диапазоне глубин, которому соответствует участок расхождения (это можно сделать 'методом пробы') и повторите

инверсию. Полученную таким образом модель георазреза наполняйте геологическим смыслом

Вне зависимости от используемого подхода формирования стартовой модели не исключена ситуация, что выбранная модель может быть верна, но решение существенно зависит от начального приближения, либо от типа программы инверсии. Это означает, что из-за эквивалентности интерпретационная задача, а значит, возможно, и геологическая, решаются с невысокой достоверностью. *В этой ситуации решающим аргументом будет Ваша оценка существенности или несущественности расхождений параметров, получаемых при разных вариантах инверсии для решения целевой геологической задачи.*

Если величина различий получаемых параметров для Вас принципиальна и слишком велика, следует попытаться *найти обоснование возможности закрепления некоторых параметров*, либо попытаться упростить модель. Но с этим также нужно обходиться с осторожностью, чтобы это упрощение не «похоронило» целевую геологическую задачу.

**Еще одна проблема малых глубин.** Пользователю следует помнить, что прямая задача, входящая в программу Подбор, не ориентирована на модели сред, в которых присутствуют тонкие приповерхностные слои. Если Вы используете установку, например, 500\*500 м, значит Вы ориентируетесь на изучение георазреза до глубин 1-2 км. При этом вряд ли в геологическую задачу будет входить изучение георазреза с десятков - первой сотни метров. Здесь же следует вспомнить проблему регистрации ранних времен процесса становления, затронутую в разделе, посвященном эквивалентности. Однако исключать этот интервал глубин из рассмотрения мы не можем, поскольку его параметры могут отражаться на параметрах нижележащих слоев. Для этого интервала мы должны предусмотреть в модели разреза 1 – 2 слоя, интерпретировать их в общем комплексе, но к полученным параметрам относиться с пониженной степенью доверия. Таким образом, по той или иной причине мы зачастую вынуждены вводить в модель разреза относительно тонкие приповерхностные слои. К сожалению, иногда это приводит к сбою работы программы прямой задачи. Результаты этих сбоев легко просматриваются на кривых RoTau в виде 2х-3х «отскачивших» точек в средней части кривой. Более часто это случается при работе с материалами, полученными на малых установках зондирования (50х50 м, 100х100 м). К счастью, эти сбои случаются нечасто и заметного дискомфорта в работу не приносят. Если вы обнаружили в работе появление «отскачивших» точек, их можно «пометить», чтобы они не входили в расчет невязки «сигма».

### **3.1.4 Подбор среды - действия в Системе.**

**Предварительные замечания.** Изложенные выше сведения относительно эквивалентности, стартовой модели и пр. призваны помочь в решении главной задачи, вокруг которой выстроена вся Система (программный комплекс) - одномерной интерпретации результата измерений на отдельном пикете. В конечном счете этот процесс сводится к выбору модели среды и подбору её параметров, при которых различие теоретической и полевой кривых ЭДС будет минимально в рамках выбранного критерия – среднеквадратической разницы «сигма».

Чтобы подойти к краткому изложению рекомендаций для процесса подбора параметров, нужно несколько слов сказать о подготовке Системы (программного комплекса) к работе, чтобы сориентировать пользователя на первое время взаимодействия с Системой.

Итак, вы ознакомились с изложенными выше описанием Системы, разделами «эквивалентность», «стартовая модель». Вы установили Систему, установили ключ-

пароль. При запуске Системы на экране появляется *окно площадной отрисовки* с данными условной площади, изначально загруженной в программу. Из этого окна можно перейти (через «профиль» – «профиль») в *окно профильной отрисовки*. В дальнейшем вы будете работать с полевыми данными главным образом через два базовых окна – площадной или профильной отрисовки. Будем их называть «окно площади» или «окно профиля». На основе полевых данных вы сформируете свои площади или профили, и через указанные окна вы сможете вызывать данные по отдельным пикетам, входящим в конкретную площадь или профиль, и производить их интерпретацию. Кстати, вы сможете организовать площадь или профиль всего из одного пикета.

**Начинаем работать с данными.** Итак, вы имеете полевые данные в виде файлов формата Подбор, прошедших предварительную обработку в программе ПРОБА. При этой обработке у вас не возникало проблем с видом, уровнем значений кривых кажущегося сопротивления или продольной проводимости, значит в этих файлах правильно введены параметры установок, тока. В эти файлы введены площадные или профильные координаты, так что можно в Системе организовать новую площадь или новый профиль, куда загружаете эти файлы. Эта процедура двухэтапная – сначала формируете «новую площадь», или «новый профиль», затем, с помощью разделов меню «файл» – «добавить пикет в площадь», загружаете ваши файлы в площадь или профиль. Если у вас нет ошибок в координатах, на экране площади или профиля появятся соответствующие изображения с разумным расположением пикетов.

Вы сформировали минимально необходимый набор окон для работы с данными («пикет» – «опции работы с пикетом»). В этот набор как минимум должны входить окна «среда», «сопротивление», «информация о пикете». Щелкнув мышью вблизи изображения пикета на площади или профиле, вы вызвали выбранные окна пикета и удобно расположили их на экране. Например, как это представлено на рис. 3.11. Здесь вы видите слева – окна «среда», «информация о пикете», справа – окна «сопротивление» и (на втором плане) «STau». Между рабочими окнами просматривается *окно* профильной (или площадной) отрисовки, откуда мы вызывали файл, с которым собрались работать., и куда легко вернуться, щелкнув мышью по этому *окну*.

Произвели настройку шкал для окон «сопротивление» и «STau». Напоминаем, что шкалы могут иметь автомасштабирование, либо жесткий масштаб, которые в меню «настройка» переключаются кнопкой «изменить шкалу».

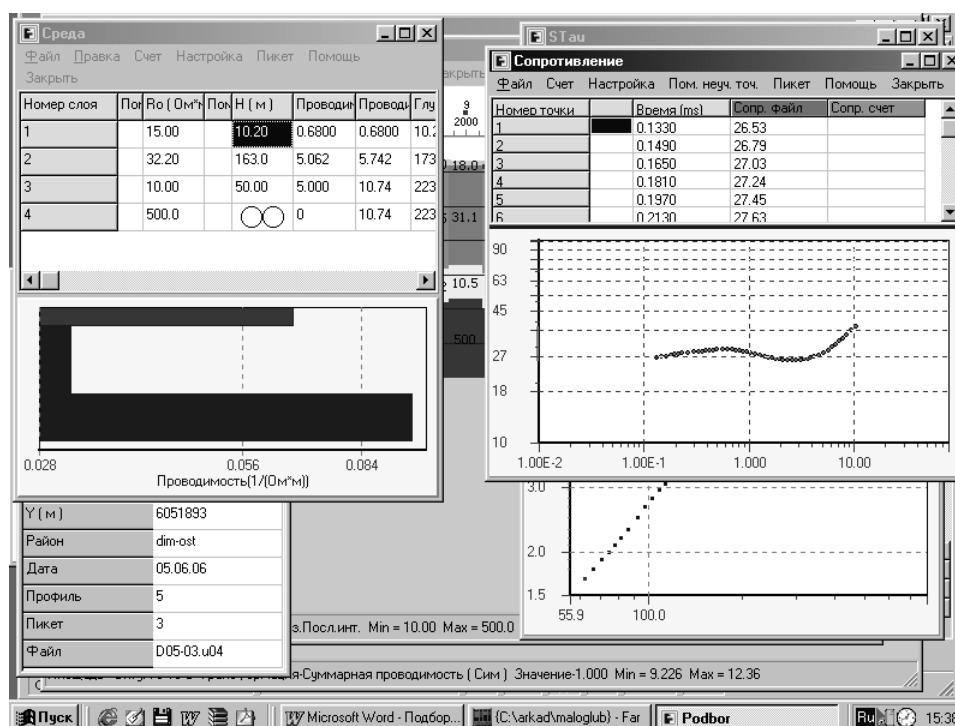


Рис. 3.11. Пример расположения рабочих окон при работе с данными пикета

На основе материалов предыдущего раздела вы определились с моделью среды и в окне «среда» отредактировали соответствующую таблицу. Теперь ваша задача – конкретизировать параметры этой модели так, чтобы кривая полевого файла минимально отличалась от теоретической кривой, параметры которой содержатся в окне «среда». Т.е. вы на пороге интерпретационного процесса.

Запустите расчет прямой задачи. Теперь в окне «сопротивление» вы увидите две кривых – полевую и теоретическую. Непосредственно над изображением кривых появится главный параметр сходимости – среднеквадратическая разница между непомеченными точками полевых и теоретических значений ЭДС – «сигма» (в %). Кроме того, в окне «разность» (если вы используете такое окно - установили соответствующий флажок в разделе «опции работы с пикетом») появится график отклонения теоретической ЭДС от полевой, в процентах.

**Приступаем к подбору параметров.** Теперь можно, редактируя параметры среды и запуская прямую задачу, пытаться приблизить теоретическую кривую к практической (процедура «ручного» подбора параметров). Если вы «сблизили» эти кривые до первых десятков процентов и менее, можно включить процедуры автоматического подбора параметров (автоматическая инверсия, в дальнейшем – просто «инверсия»). Здесь нужно дать несколько пояснений.

Если есть необходимость исключить из рассмотрения процедуры инверсии какие – либо «отскачившие» точки, то их следует *пометить*, и Система не будет их учитывать в работе процедур инверсии и при расчете сходимости «сигма». Пометка осуществляется в окнах изображений кривых ЭДС или RoTau. Для пометки встаньте на точку стрелкой и дважды кликните мышью. Точка активизируется, и в таблице сопровождения (над графиком) появится строка с затемненным окном, соответствующая активизированной точке. Теперь пометить точку или группу точек можно через окно меню «Пом. неуч. точ». Помеченная точка или группа точек будет иметь другое изображение на графике.

Первые помечаемые точки можно назначить из рассмотрения кривых ЭДС или RoTau. На заключительной стадии процесса инверсии, возможно, будут обнаружены еще «шумливые» точки с помощью графика отклонения теоретической ЭДС от полевой («разность»). Для хорошей работы обратных задач нужно будет пометить и эти точки.

Процедуры инверсии варьируют параметры среды, которые пользователь отмечает, пометкой параметров с помощью клавиши '\*', либо двойным кликом мыши в графе «пометка» таблицы среды. Не нужно стремиться одновременно варьировать как можно больше параметров – тем самым увеличивается эквивалентность и существенно увеличивается время счета. Не нужно варьировать невлиятельные параметры (например, не стоит варьировать сопротивление воздушного слоя при работе с экспериментальными файлами, полученными при физическом моделировании), Система будет выдавать бессмысленные числа. Если возможно сгруппировать параметры по каким - то признакам, тогда можно сначала подобрать одну группу параметров среды, а потом, закрепив первую группу, провести подбор по параметрам второй группы и т. д.

Возможно комбинирование *пометок параметров* и *пометок точек*. Так, при работе с многослойными моделями разрезов часто используется следующий прием. Сначала подбираются параметры верхней части разреза, а потом - нижней. Для начала необходимо определить времена, на которых группа нижних слоев еще не влияют на начальную-среднюю часть кривой. Для этого нужно поменять параметры верхнего слоя из группы нижних слоев и посмотреть, с какого времени сказывается это изменение. Теперь можно пометить точки кривой позже этого момента времени и варьировать (пометить) параметры только вышележащих слоев. Подобрав параметры верхних слоев, можно распометить точки поздних времен; и, может быть, пометить точки ранних времен. Теперь нужно закрепить (распометить) параметры верхних слоев и варьировать (пометить)

параметры нижних слоев. Группы варьируемых параметров первого этапа и второго этапа, как правило, назначаются с перекрытием. Например, при подборе параметров пяти слоев, на первом этапе варьируем параметры слоев 1, 2, 3, 4, на втором – 4, 5, либо по-другому: на первом - 1, 2, 3, на втором – 3, 4, 5. На завершающем этапе распомечаются все (нешумливые) точки кривой и выборочно варьируются параметры разреза. Иногда приходится проделать 2-3 таких уточняющих цикла, с возвратом и уточнением верхней и нижней частей разреза.

**Инверсионные программы.** В состав Системы входит 4 процедуры автоматической инверсии:

**AUTO1, AUTO2** (Ctrl-Shift-F10), **NEWTON** (Shift-F10), **LEMA** (Ctrl-F10)

В процедуре AUTO1 среда ищется с помощью перебора всех возможных вариантов разрезов в некоторой окрестности первоначального приближения.

В процедурах AUTO2 и NEWTON для обеспечения поиска вычисляют производные по параметрам среды, используя аналитические формулы. Использование аналитических формул позволяет вычислять производные с такой же точностью, с какой вычисляются прямые задачи.

В процедуре LEMA производные по параметрам вычисляются численно.

LEMA, NEWTON, AUTO2 используются градиентные методы поиска среды.

AUTO1, AUTO2 «двигаются к цели» «малыми шагами», подразумевают многократное повторное применение.

NEWTON, LEMA выдают после первого запуска, как правило, наилучший вариант, при повторном запуске они обычно уже ничего не меняют. Если стартовая модель «слишком далека» от хорошего результата, и по какому-то параметру требуется изменение больше, чем в 10 раз, процедуры перестают работать, т.е. не меняют среду. Просмотрите помеченные параметры, и если найдете маловлиятельный параметр – распишите его. Или перейдите к другим процедурам.

Для каждого типа разреза, конкретной ситуации возможна своя, наиболее оптимальная стратегия действия, и порядок использования процедур инверсии.

Например, в условиях повышенной эквивалентности, выдержанного разреза, при наличии надежных априорных сведений о модели, можно опираться на следующие рекомендации. Для всех кривых профиля используется одна стартовая модель среды. В инверсии используются главным образом процедуры AUTO1, AUTO2. Тогда в результатах инверсии будут максимальным образом «просматриваться» основные черты стартовой модели разреза. И при этом, можно предположить, что неустойчивость решений, вызванная эквивалентностью, будет проявляться во всех результатах инверсии близким, схожим образом, что лучше поможет проявиться особенностям латеральных изменений разреза.

В условиях контрастных, изменчивых разрезов, в качестве стартовой модели можно использовать финишную модель предыдущего пикета. Здесь смелее можно использовать процедуры NEWTON и LEMA, на завершении - AUTO1, AUTO2.

При использовании процедуры AUTO1 не рекомендуется помечать больше 6-7-и параметров из-за резкого увеличения времени счета.

**Как оценить полученный результат, где остановиться?** В процессе инверсии интерпретатор контролирует величину среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  (Сигма), отслеживая её уменьшение. До какого значения Сигма производить варьирование параметров, пользователь должен определить сам, но из нашего опыта следует, что теоретические кривые можно подбирать с точностью до долей процента, а полевые - при хорошем качестве первичного материала - до уровня 1-2 %. При этом мы полагаем, что «шумливые» точки кривых исключены из рассмотрения пометкой.

Ответ на вопрос правильна ли выбранная модель разреза, в общей постановке весьма нетривиален. Если его рассматривать в несколько упрощенной постановке, то ответ можно свести к следующим положениям.

Процесс инверсии может привести к двум вариантам результатов.

Первый вариант – мы не получили хорошего согласия теоретической и практической кривых. (при этом предполагается, что мы исключили из рассмотрения точки полевой кривой, которые недостоверны, и мы обладаем достаточным опытом в анализе и интерпретации кривых ).

Отметим, что под понятием «хорошего согласия» мы понимаем, что при хорошем качестве полевого материала, при «гладких» кривых  $Ro\tau_{au}$  и «почти гладких»  $STau(H\tau_{au})$  величина Сигма не превышает 1 – 2 %. Это порядок величин, отражающий степень «гладкости» экспериментальных данных хорошего качества.

Итак, если мы не получили хорошего согласия теоретической и практической кривых, то в большинстве случаев это означает, что принятая модель разреза слишком «упрощена», и модель следует усложнить. В принятии этого решения полезным оказывается анализ графика «разность». Если мы наблюдаем на этом графике «пузырь» из нескольких (более 3-5) точек с отклонением более нескольких процентов, целесообразность усложнения модели весьма вероятна. Последующая интерпретация «усложненной модели», как правило, дает положительный результат.

Второй вариант – в процессе инверсии мы получили «хорошее согласие». Это еще не значит, что полученная модель окончательна. Необходимо её проанализировать на предмет возможного упрощения, например, выявления тонких высокоомных слоев, которые можно удалить, либо близко расположенных тонких высоко- и низкоомных слоев, которые следует объединить. После подобных «упрощающих доработок» модели следует снова повторить процесс инверсии. Если в новом варианте модели удастся получить «хорошее согласие», то на этой модели можно остановиться.

После завершения работы над интерпретационной моделью и инверсией в рамках этой модели следует перейти к оценке эквивалентности, неоднозначности полученных решений. При этом не следует пытаться исследовать все параметры разреза на эквивалентность. Достаточно выбрать несколько параметров, значимых для геологических заключений. Например, влияющих на структурный план по какому-то горизонту, на глубину до фундамента и т.д. Указанные исследования строятся по следующей схеме. Параметр, полученный при первичной инверсии, специально изменяется в ту или иную сторону, после чего проводится повторная инверсия, причем этот параметр закрепляется (не варьируется). Новое решение дает новое значение невязки «сигма». Если её увеличение незначительно, то решение принимается как допустимое. Изменяя исследуемый параметр в различной степени и с разным знаком, можно определить диапазон его изменения, при котором Сигма возрастает не более чем на 20 – 30 %. Этот диапазон будет диапазоном возможных значений для данного параметра.

После того, как завершится этап первичной интерпретации профиля или площади, наступает этап вторичной интерпретации. Вам придется осмыслить выявленные особенности строения участка, и в рамках этих особенностей еще раз «проработать» все пикеты, произвести согласование и увязку всех полученных результатов.

#### **Еще несколько разных советов.**

- Когда вы приступаете к обработке данных по участку, формируете площадь или профиль, в полевых файлах формата Подбор отсутствует модель среды. Если вы провели инверсию с данными пикета, и нужно сохранить тот вариант среды, который вас устраивает, то можно записать среду в тот файл, который был введен в Систему как полевой (F2). Т.е. теперь файл будет содержать среду. Если в процессе продолжения работы найден другой, более подходящий вариант среды, можно снова записать его в файл, на место предыдущего варианта среды. В дальнейшем, при следующем вводе файла

в Систему (при вызове данных пикета) будет вводиться последняя сохраненная среда. Среда, которая была в Системе перед вызовом файла, будет утрачена. Т.е. мы не можем для данного пикета сохранить 2-3 варианта сред.

В связи с этим удобно создать несколько копий полевых файлов (без среды). Для этого до начала интерпретации нужно скопировать полевые файлы в несколько директорий. При такой организации работы можно в сложных, сомнительных случаях при работе в основной директории обращаться к резервным копиям файлов, для того, чтобы провести там интерпретационные эксперименты, не потеряв результаты проделанной ранее работы

- Выше мы говорили о возможности доступа к полевым данным через организацию площади или профиля. Помимо такого способа доступа (вызова файла для анализа) есть еще один вариант, без организации новой площади или профиля. Находясь в окне какой-то площади или профиля, можно вызвать на экран информацию по какому-то (любому) пикету, щелкнув мышью по изображению пикета на площади или под изображением пикета на профиле. На экране откроются окна с информацией по пикету. (набор этих окон вы устанавливаете через кнопки меню «пикет» – «опции работы с пикетом»). Теперь в любом окне нажмите кнопку «файл», выберите опцию «открыть файл данных». Далее, через обзор найдите нужную папку и вызовите нужный файл на экран.

- Несколько слов о графике процентного расхождения полевой и теоретической кривых ЭДС. На этом графике отмечается условный «интервал доверия». Этот интервал не участвует ни в каких расчетных процедурах, а служит лишь для облегчения визуального чтения графика. Он становится полезным на поздних стадиях подбора кривых, когда уровень их различия становится незначительным. Разумная ширина интервала должна отражать два обстоятельства. Во-первых, какого минимального уровня расхождения полевой и теоретической кривых (Сигма) мы собираемся достигать в процессе инверсии. Во-вторых, каков уровень точности полевого материала.

При поставке Системы ширина интервала определена в 1%. Такой интервал удобен при работе с полевым материалом хорошего качества, а также при экспериментах с псевдополевыми кривыми. Интервал доверия можно изменить в настройках окна сравнения ЭДС.

Использование графика особенно актуально в том случае, когда теоретические и полевые кривые в окне «сопротивление» практически неразличимы, а нам нужно принять решение о детальной согласованности теоретических и полевых данных. В частности, когда нужно принять решение о возможности и целесообразности усложнения модели.

- При исследовании на эквивалентность следует помнить, что наличие эквивалентности, неоднозначности решений выражается в том, что при использовании стартовых моделей с разными параметрами процесс инверсии приводит к разным решениям. Если эта разница существенна для геолого-геофизической трактовки результата (целевые параметры) и использование сторонних сведений о разрезе (закрепление некоторых параметров) не снижает неоднозначности решения, то следует признать, что задача по целевым параметрам или характеристикам разреза в данном случае не решается.

- В Системе можно организовать разные варианты вызова стартовых моделей при вызове (загрузке) данных пикета для первичной интерпретации. При вызове пикета, не имеющего среды, возможны следующие варианты

- в окне среды остается среда от предыдущего пикета;

- в окне среды появляется среда, специально сформированная для работы с данными рабочей площади;

- в окне среды появляется среда, специально сформированная для работы с данными рабочим профилем;

Вызов стартовой среды зависит от настроек опций в окне среда. Для выбора необходимых параметров нужно вызвать окно среды, войти в меню – настройки - опции среды и в открывшемся окне выбрать необходимое значение в параметре – стартовая среда.

Ввод стартовой среды для рабочей площади (профиля) вводится в окне площади (профиля) через меню Файл – Стартовая среда. После ввода необходимой среды нажмите клавишу ОК и набранная среда сохранится в базе, как стартовая среда для рабочей площади (профиля). При последующих вызовах пикета, если к пикету не привязана какая-либо среда, в качестве стартовой будет вызываться среда или из рабочей площади или из рабочего профиля или будет оставаться среда уже введенная в окно.

### 3.1.5 Исследовательская работа с Системой

Средствами системы Подбор можно проводить исследования по влиянию формы импульса, конфигурации установки, определенного слоя и т.д. Для этого имеется возможность формировать теоретический файл в таком же виде, как полевой, по тому образцу полевого, который вы вызвали для организации численного эксперимента (с той же шкалой времен).

Например, желательно узнать, имеет ли смысл учитывать реальную форму импульса при расчетах, или можно обойтись «ступенькой». Для этого нужно выбрать «образцовый» файл с необходимой шкалой времен и установкой зондирования, и сформировать численное описание импульса. Заметим, что «образцовый» файл в большинстве случаев можно получить и с помощью редактирования в окнах ЭДС и «установка».

Численное описание импульса должно передавать форму импульса (главное - длительность и характер фронта выключения). Кроме того, на шкале времен импульса момент  $t=0$ , должен соответствовать нулевой временной точке в полевой кривой. В качестве примера приведем два варианта численного описания для импульса длительностью 100 мс с линейным фронтом выключения 0.6 мс. В первом варианте 0 по времени совпадает с началом процесса выключения, во втором варианте совпадает с серединой процесса выключения.

Таблица 3.6

N узла	1 вариант		2 вариант	
	Время (мс)	амплитуда	Время (мс)	амплитуда
1	-1001	0	-1001	0
2	-1000	1	-1000	1
3	0	1	-0.3	1
4	0.6	0	0.3	0

Детали описания формы переднего фронта несущественны, поэтому в обоих вариантах одинаковы.

Итак, определившись с описанием импульса, выберите характерный вариант георазреза (среду) и посчитайте для выбранного импульса кривую. После этого сформируйте новый файл (клавиша F8), в котором расчетная кривая становления будет записана в качестве полевой кривой. Далее можно вызвать этот файл, как любой другой файл с полевыми результатами. Измените форму импульса на ступеньку и посчитайте прямую задачу. Теперь можно сравнить псевдополевую кривую (расчет с Вашей формой импульса) и теоретическую кривую (расчет со ступенькой). Если расхождения невелики и



такая точность является удовлетворительной, то можете работать со ступенькой. В этом случае не стоит усложнять работу учетом конкретной формы импульса. Если влияние формы импульса существенно и нужно работать с ее учетом, в численном описании импульса необходимо фактическое (экспериментальное) положение момента  $t=0$ , как на это указывалось в рассмотренном примере. Заметим, что если реальный импульс соответствует варианту 2, то корректность использования в интерпретации импульса Хевисайда обеспечивается в более широком диапазоне времен.

В этом примере мы исследовали влияние определенного фактора на ЭДС. Можно поставить задачу шире. Допустим, нужно оценить, к каким ошибкам в интерпретации приведет неточное аппаратное формирование момента  $t=0$ . Можно поступить следующим образом. Выполнив расчет для интересующего разреза при реальной форме импульса, с учетом фактического расположения на нем точки  $t=0$ , принимаем эту кривую за псевдополевою. Проведем интерпретацию этой кривой, предварительно изменив параметры среды, и убедимся, что в процессе интерпретации мы получаем практически ту же среду, что и исходная. Далее, отредактировав импульс, т.е. введя положительную или отрицательную задержку, в зависимости от сведений, которыми мы располагаем, снова проведем интерпретацию с использованием тех же процедур инверсии. Мы получим иные параметры среды. Сравнивая их с исходными, можно оценить, существенны они для решения геологической задачи, или нет. Естественно, в процессе этих экспериментов нужно обратить внимание на расхождение исходной кривой и кривой, полученной в результате интерпретации (показатель Сигма). Если эти расхождения значительны, значит в рамках прежней модели среды для нового варианта импульса не находится близкого решения. В этом случае следует повторить интерпретацию, усложнив верхнюю часть среды (увеличив количество слоев).

Еще, например, можно выполнить оценку ошибок интерпретации, вызванных погрешностями в экспериментальных определениях величины тока (и входящих в него коэффициентов). Для этого, сформировав реальный импульс, близкий к ступеньке (импульс Хевисайда не редактируется), для интересующего типа разреза получим псевдополевою кривую. Далее, отредактировав амплитуду импульса, например, с помощью множителя (предпоследняя строка левого столбца), или отредактировав значение тока, интерпретируем полевою кривую с новым импульсом (или током). Не принципиально, что мы вводим погрешность в теоретическую, а не в экспериментальную кривую.

Допустим также, вы хотите определить можно ли выделить тонкий слой в некотором интересующем разрезе. Можно рекомендовать следующий вариант проверки. Сформируйте и вызовите псевдополевою файл для полной (с тонким слоем) среды. Измените параметры среды, проведите интерпретацию и убедитесь, что вы получаете параметры разреза, близкие к исходным. При этом ясно, что эквивалентность у данного разреза невелика и имеет смысл рассматривать задачу далее. Теперь изменим среду, исключив упомянутый тонкий слой. Проведем интерпретацию в рамках этой новой модели среды с использованием тех же процедур инверсии. Если с новой моделью среды при инверсии удастся без труда получить показатель расхождения Сигма такого же уровня, что с исходной моделью, то шансы на выделение в разрезе исследуемого тонкого слоя невелики, а точнее - отсутствуют. В этом случае ситуацию могут изменить ограничения на возможные изменения параметров вмещающей среды, которые из иных источников могут быть известны интерпретатору.

На основе рассмотренных выше примеров, надеемся, понятно, как сформулировать другие возникшие проблемы и исследовать их. В практической работе очень важно знать, что ваши цели (по расчленению разреза) соответствуют возможностям и средствам (параметрам вашей установки и аппаратуры). Исследовательская работа в системе Подбор позволяет это установить заранее и избежать бесполезных усилий.

Моделирование в системе Подбор может существенно пополнить ваш профессиональный опыт и обогатить вашу интуицию интерпретатора.

## 3.2 Примеры проведения работ

В этом разделе (последнем в книге) мы демонстрируем несколько примеров успешного применения системы Подбор для обработки и интерпретации данных ЗСБ. Надо заметить, что мы имели для этого широкий выбор, а представленные материалы были использованы просто в силу наличия их в руках авторов в наиболее оформленном виде.

### 3.2.1 Работы на Татарском своде.

В качестве примера ниже приведены результаты работ ЗСБ, полученные в НПУ «Казаньгеофизика» на региональном профиле №4 в 2003 г.

Материалы любезно предоставлены авторам отв. исполнителем работ, гл. геофизиком НПУ «Казаньгеофизика» д.г.м.н. Каримовым К.М. и ст. геофизиком партии ЗСБ Шишкиным В.К.

В качестве аппаратного обеспечения работ использовались разработки СНИИГТиМС, (системы «ЦИКЛ-4», «ЦИКЛ-5»). Энергоисточником служила генгруппа УГЭ-50. Установка зондирования – 800х800 м, сила тока – 70 А. Глубинность исследований – 2.5 – 3.0 км.

Профиль длиной 130 км расположен в пределах Северо-Татарского свода. Направление профиля – с юго-запада на северо-восток; на юго-западе он проходит по западному склону Северо-Татарского свода, и далее, на северо-восток – по его сводовой части.

Интерпретация данных ЗСБ выполнена с использованием интерпретационной системы Подбор. В формировании стартовой интерпретационной модели разреза использовались данные глубокого бурения и каротажа скважин (122, 139, 136, 137 и т.д.), расположенных в непосредственной близости от профиля. По результатам анализа данных скважин была составлена предварительная модель разреза, которая в процессе интерпретации была уточнена и в итоге для центральной и северо-восточной части профиля использовалась шестислойная модель разреза, а для крайнего юго-западного участка применялась семислойная модель, с дополнительным проводящим слоем в основании разреза. Основанием разреза служил высокоомный опорный горизонт, отождествляемый с кристаллическим фундаментом. Появление седьмого слоя в основании разреза в юго-западной части профиля связывается с увеличением мощности нижней терригенной толщи тиманского горизонта. Ниже, в таблице, приведена стратиграфическая привязка интерпретационной модели разреза.

Таблица 3.7. Стартовая модель разреза для интерпретации на профиле

СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ ДЕЛЕНИЕ РАЗРЕЗА НА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ	№ слоя	МОДЕЛЬ	
		Roi	hi
Терригенные четвертичные, карбонатные пермо карбона	1	30	350
	2	20	250
От мячковского до кровли башкирского ярусов	3	4	300
От кровли башкирского до кровли тульского ярусов	4	4	250

Тулско - бобриковский терригенный комплекс			
Карбонаты нижнего карбона-верхнего девона, от черепетского до семилукского ярусов	<b>5</b>	6	700
Саргаевский и кыновский (тиманский) карбонатно-терригенный комплекс; при увеличении мощности кыновского (тиманского) комплекса он выделяется в отдельный слой	<b>6</b>	1-5	100
Кристаллический фундамент	<b>7</b>	$\infty$	$\infty$

Геоэлектрический разрез, полученный в результате интерпретации, представлен на рис. 3.13.

Не углубляясь в подробный анализ деталей полученных особенностей строения геоэлектрического разреза, отметим основные геологические итоги результатов работ полученных на основе анализа геоэлектрического разреза:

- в пределах Северо-Татарского свода отмечается положительная структура по поверхности фундамента, соответствующая Ковалинскому блоку;
- выделены участки развития терригенных отложений верхнего девона (кыновский горизонт) увеличенной мощности с улучшенными коллекторскими свойствами;
- выделены участки развития терригенных отложений визейского яруса с увеличенной продольной проводимостью, что может связываться с улучшением их коллекторских свойств;
- намечены зоны развития повышенной тектонической трещиноватости в карбонатных отложениях осадочного чехла.

### **3.2.2 Результаты переинтерпретации данных электроразведки ЗСБ на Собинском участке (Сибирская платформа, Катангская седловина).**

В 2004 г проведена работа по переобработке и переинтерпретации материалов ЗСБ по работам 1979 – 1983 г.г, полученных на Собинском участке Катангской седловины Сибирской платформы. Полевые работы в указанные годы вела Катангская геофизическая экспедиция ПГО «ЕНИСЕЙГЕОФИЗИКА». Общий объем данных на исследуемой площади – 460 физнаблюдений.

В работе использовалась аппаратура «ЦИКЛ-2», генераторный контур – 800х800 м, ток 100 А, энергоисточник – дизельная электростанция Р=60 кВт.

В данных условиях ЗСБ контролирует латеральные изменения продольной проводимости венд-рифейского комплекса, глубину до высокоомного основания разреза, нарушения и латеральные изменения в карбонатно-солевой толще нижнего-среднего кембрия, в верхней части разреза (глубина до 600 м) – суммарную мощность траппов.

На рис. 3.14 и 3.15 представлены фрагменты из результативной графики по результатам интерпретации – геоэлектрический разрез по ПР 45-60-84 и карта-схема площадного распределения продольной проводимости венд-рифейского комплекса – одного из основных объектов изучения. На этой же схеме вынесено положение представленного профиля.

На анализируемом участке по бурению и сейсморазведке хорошо известен структурный план по кровле венда. Эти данные использовались при интерпретации ЗСБ, поэтому на разрезе кровля венд-рифейских отложений выглядит «гладкой».

На венд-рифейских отложениях залегает относительно высокоомный карбонатно-солевой комплекс нижнего кембрия, мощностью 2-2.5 км. Этот комплекс перекрыт

постнижнекембрийскими терригенно-карбонатными отложениями, зачастую насыщенными трапповыми пластовыми интрузиями.

В средней части профиля в пределах карбонатно-солевой толщи на ряде пикетов наблюдается наклонный слой, отражающий, по всей видимости, косой надвиговой разлом, в области плоскости скольжения которого сосредоточены рассольные воды. В северо-восточной части профиля мы видим нарушение целостной картины прослеживания разреза. Это зона палеовулкана, где латеральная неоднородность разреза достаточно сильна и где перестает «работать» одномерный подход в интерпретации.

По площади построено пять карт геоэлектрических и структурных параметров. Карта продольной проводимости венд-рифейского комплекса, представленная на следующей странице, являлась одной из важных информационных составляющих при выработке стратегии дальнейших геолого-геофизических работ на лицензионном участке

### **3.2.3 Результаты работ ЗСБ в Катангской седловине на Ереминской площади**

На представленном геоэлектрическом разрезе рис. 3.16 приведены результаты работ ЗСБ, полученные в процессе изучения геологического строения области сочленения Катангской седловины и Непско-Ботуобинской антеклизы Центральной части Сибирской платформы. Работы проводила Катангская геофизическая экспедиция ПГО «Енисейгеофизика» (Бубнов В.М.), с участием СНИИГГиМС.

Длина профиля составляет около 30 км, где выполнено 17 зондирований. Достигнутая глубинность исследований не менее 3 км. Работы проводились с генераторной установкой 800 x 800 м, при токе 100 А,. Приемная петля 500 x 500 м, аппаратура «ЦИКЛ-2».

В данном регионе нефтепроявления связываются главным образом с вендским терригенным коллектором ванаварской свиты, залегающей выше несогласия, на абсолютных отметках глубины 1600 – 1800 м. В северо-западной части профиля по ЗСБ отмечается наличие водонасыщенного вендского коллектора. Кроме того ниже, на отметках примерно 2500 - 3000 м отмечается также наличие проводящих пород предположительно рифейского возраста.

В районе восьмого пикета наблюдений можно констатировать выклинивание проводящих отложений рифея, залегающих ниже границы несогласия. Однако далее по профилю, на следующих пикетах наблюдений, проводящий слой отмечается выше по разрезу, теперь в преимущественно карбонатных отложениях нижнего-среднего кембрия. Далее, на юго-восток, глубина до проводящего слоя уменьшается и слой выходит к кровле отложений нижнего – среднего кембрия в районе пикета 15, где и выклинивается. Обращаем внимание, что проводящий слой рассекает несогласно высокоомную (преимущественно карбонатную) толщу нижнего-среднего кембрия под углом около 10 град.

Геологическая трактовка наблюдаемой картины в последнее время нами связывается с наличием «косого разлома» с надвигом, плоскость скольжения которого обводнена минерализованными водами и сопровождается, вероятно, обширным развитием трещиноватости и карста.

### **3.2.4 Пример работ ЗСБ в Приенисейском прогибе**

Площадь работ охватывает Оленчегинскую структуру, расположенную в Западном обрамлении Сибирской платформы, в зоне сочленения Приенисейского прогиба и Енисейского кряжа. Работы проводила Богучанская геофизическая экспедиция, (Шепиленко А.М., Хайсанова Т.Ф., Шапорев В.А.), при методическом руководстве СНИИГГиМС.

Предшествующими сейсморазведочными работами ОГТ была выявлена структура по горизонту «М», соответствующему кровле терригенных отложений венда. Бурение подтвердило эту привязку и вскрыло однородную терригенную толщу венда мощностью 600 м.

Электроразведка ЗСБ ставилась с задачей расширить информацию о параметрах коллектора: водонасыщенность, выдержанность по латерали. На представленной части профиля длиной около 60 км приведены данные по 20 зондированиям. Работы проводились с генераторной установкой 800 x 800 м, при токе 100 А, приемная петля 500 x 500 м, аппаратура «ЦИКЛ-2».

По данным электроразведки ЗСБ ниже горизонта «М» прослеживается проводящий слой, однозначно увязываемый с терригенной толщей венда (на профиле обозначенный голубым цветом). В силу известной «эквивалентности по S» в данном случае электроразведка надежно дает глубину до середины проводящего слоя и его продольную проводимость. Толщина этого слоя определяется с невысокой достоверностью.

Однако толщину этого слоя удалось определить из сопоставления данных сейсморазведки (кровля слоя) и электроразведки (середина слоя).

На основе этого был сделан вывод, что в пределах участка работ изменение проводимости терригенных отложений связано с изменением их мощности, а сами коллекторские свойства этих отложений являются достаточно выдержанными по латерали. Исключение составляют 3 пикета наблюдений, расположенные юго-восточнее скважины Ол 152, где имеется локальное понижение продольной проводимости шириной 6 – 7 км, что может быть связано либо с ухудшением коллекторских свойств.

### **3.2.5 Йемен, 1997. Участок Warazan**

**Задачи работ.** Задачей гидрогеологических работ в республике Йемен являлся поиск подземных водных резервуаров для обеспечения водой нужд г. Саны. Регионально распространенным перспективным коллектором для этих целей являлись отложения тавильских песчаников (Tavilla), мощность которых достигает нескольких сотен метров. На перспективных участках эти отложения были перекрыты более поздними осадочными породами и аллювием. Было обследовано три перспективных участка (потенциальных зон водонакопления), где задачей ЗСБ являлось выделение и картирование условий залегания тавильских песчаников. На обследованных участках этот комплекс пород в водонасыщенном и сухом состоянии выделялся как относительно высокоомный слой с удельным сопротивлением 40 – 100 (Ом\*м).

Заметим сразу, что два из трех обследованных участков удовлетворяли необходимым техническим требованиям по глубине уровня грунтовых вод и дебиту и были в дальнейшем введены в эксплуатацию. Мы же обращаем ваше внимание к третьему участку – Warazan, на котором глубина залегания тавильских песчаников оказалась больше условий технических требований. Это не позволило принять участок к разработке. Однако геофизический материал этого участка оказался чрезвычайно интересным с позиции иллюстрации возможностей электроразведки.

**Геоэлектрический разрез.** На профиле длиной около 6 км было выполнено 16 зондирований с установкой 200 x 200 м, с током 20 А. На профиле представлен геоэлектрический разрез, где голубым цветом представлены низкоомные отложения, красно-коричневым - высокоомные. Основная часть разреза представляет собой систему чередующихся низкоомных и высокоомных пластов, имеющих падение в западном направлении под углом около 10 градусов. Система чередующихся пластов представляет собой вулканические породы, а именно – низкоомные, рыхлые, водонасыщенные туфы сменяются плотными высокоомными эффузивами. В основании разреза коричневым цветом выделены тавильские песчаники.

Таким образом, с помощью электроразведки удалось закартировать склон палеовулкана, перекрывающего отложения тавильских песчаников. В дальнейшем, в районе восточной части профиля, по космоснимкам обнаружен кратер палеовулкана.

Таким образом, с помощью электроразведки удалось закартировать склон палеовулкана, перекрывающего отложения тавильских песчаников. В дальнейшем, в районе восточной части профиля, по космоснимкам обнаружен кратер палеовулкана.

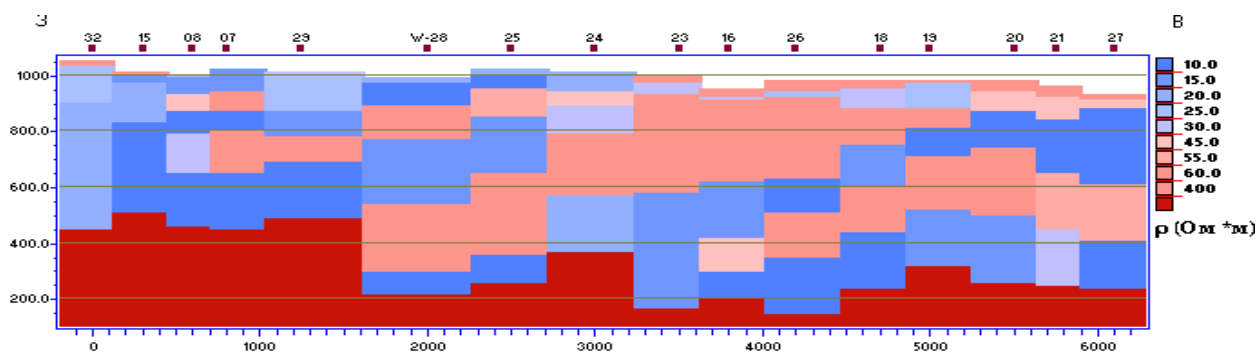


Рис. 3.12. Геоэлектрический разрез участка Warazan  
По результатам интерпретации данных ЗСБ, Йемен, 1997 г.

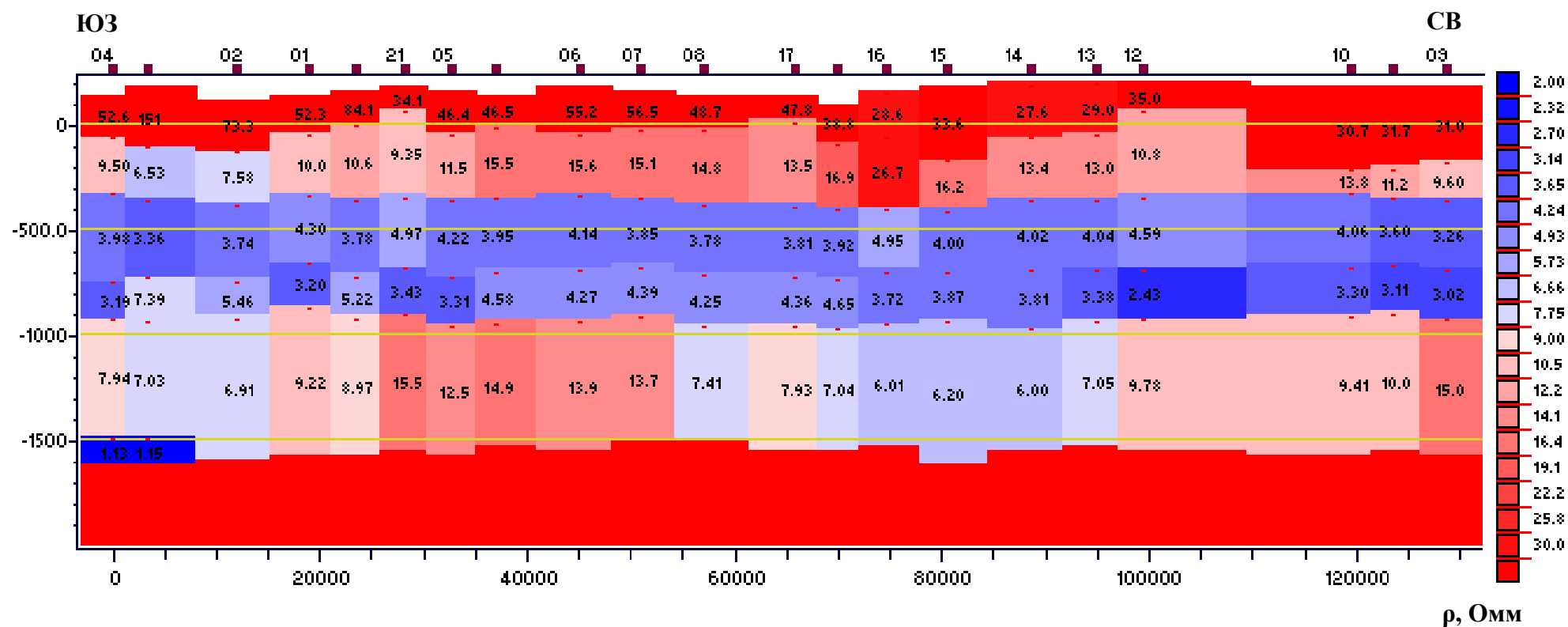
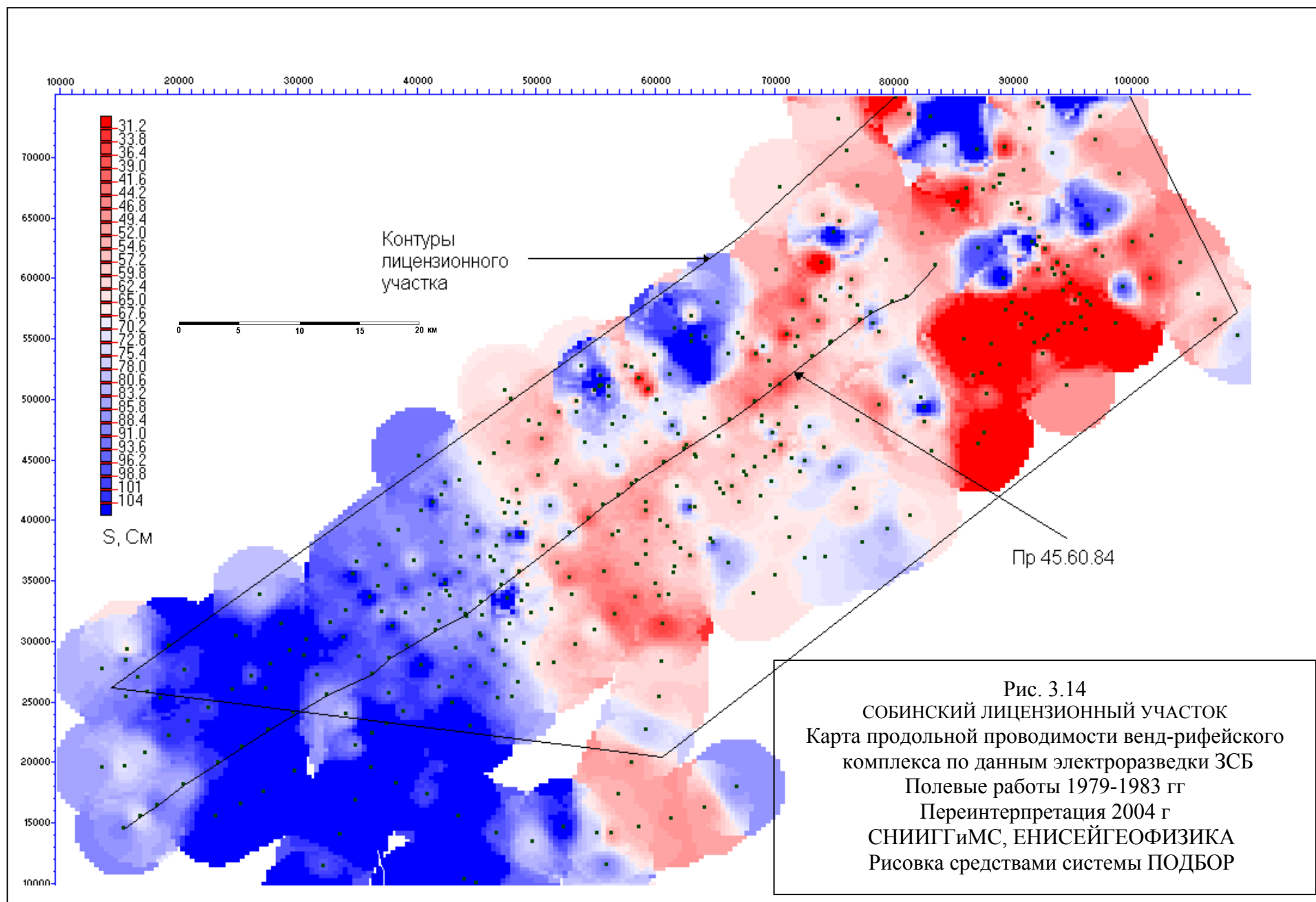


Рис. 3.13. Геоэлектрический разрез по региональному профилю №4 (Северо-Татарский свод)





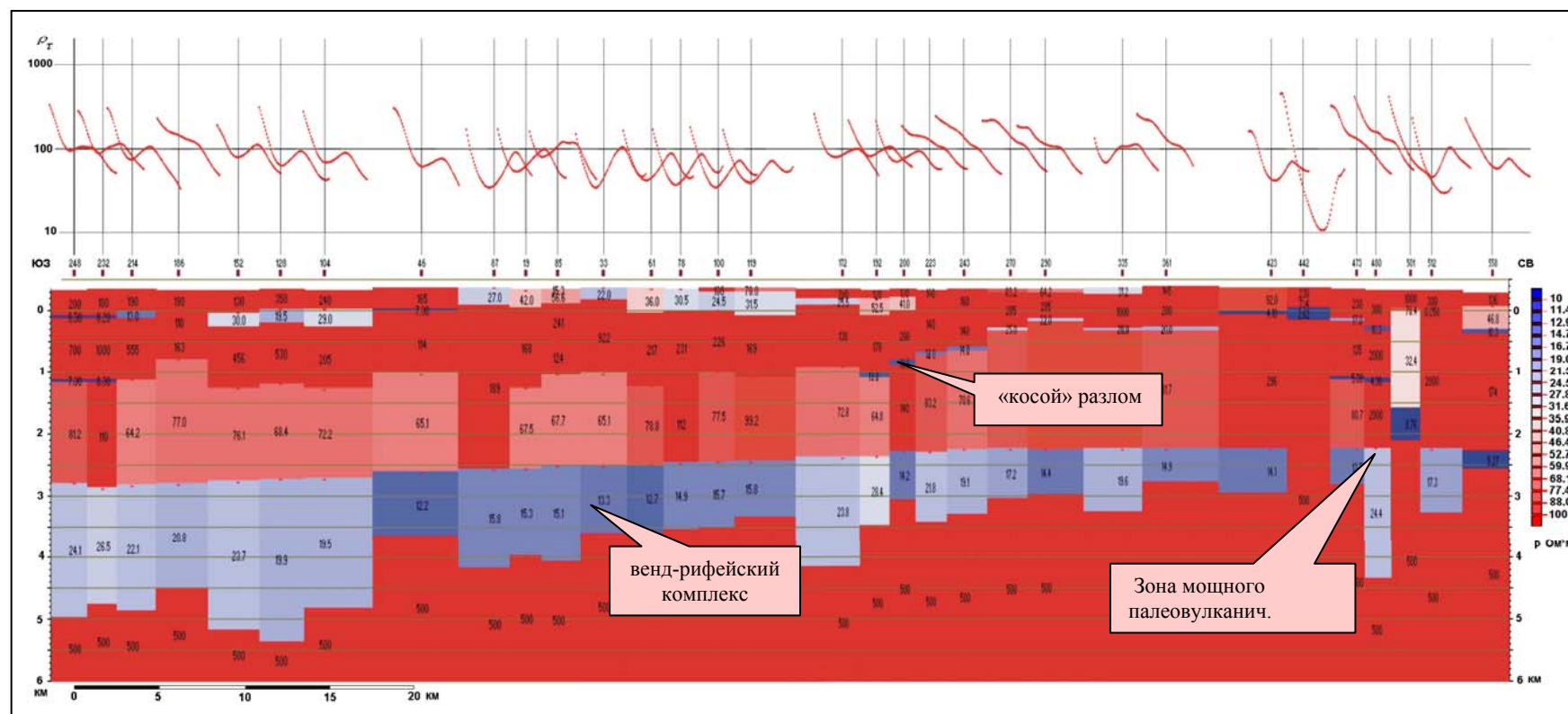


Рис. 3.15. Геоэлектрический разрез по результатам послойной интерпретации в системе «ПОДБОР». Профиль 45-60-84

Результаты переинтерпретации данных электроразведки ЗСБ на Собинском лицензионном участке  
 Полевые работы 1979-1983 гг. Общий объем на исследуемой площади – 460 физнаблюдений.  
 Переинтерпретация 2004 г СНИИГГиМС, ЕНИСЕЙГЕОФИЗИКА

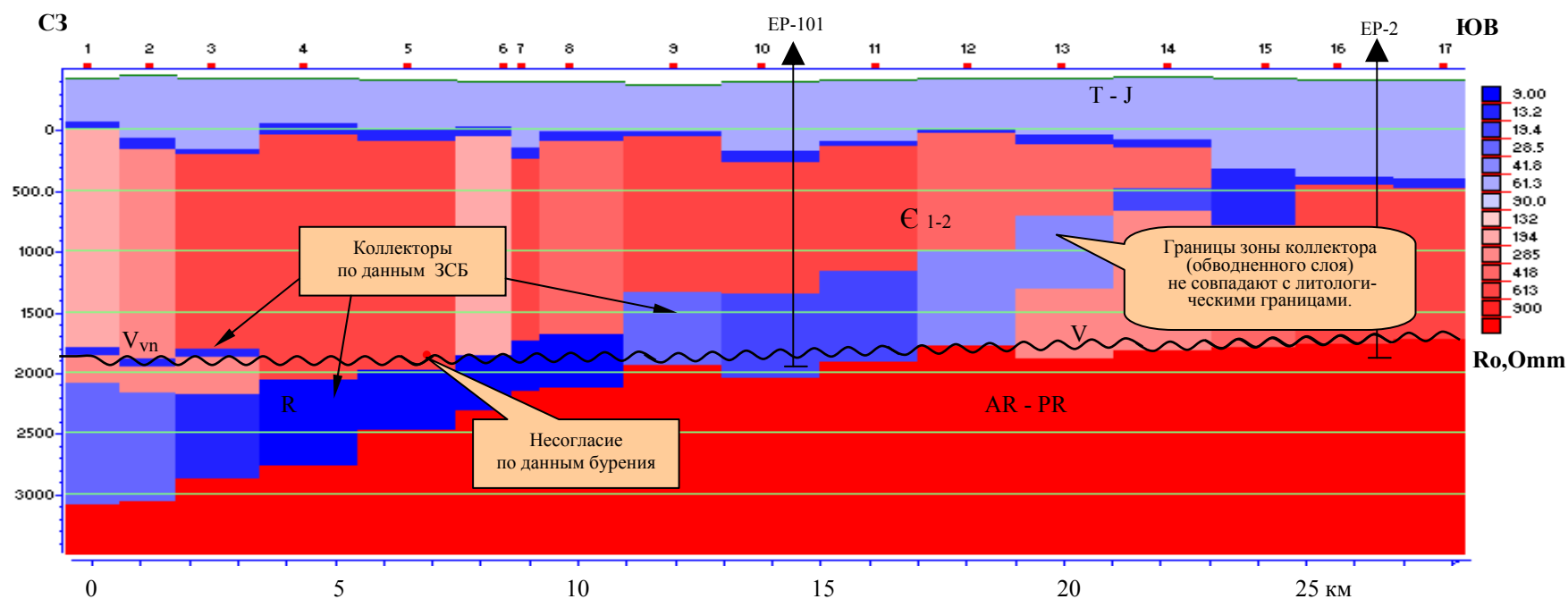


Рис. 3.16. Электроразведка ЗСБ при картировании коллекторов в области сочленения Катангской седловины и Непско-Ботуобинской антеклизы.

Геоэлектрический разрез (результаты послойной интерпретации в Системе ПОДБОР ) по профилю 310 Ереминской площади, с учетом данных глубокого бурения.

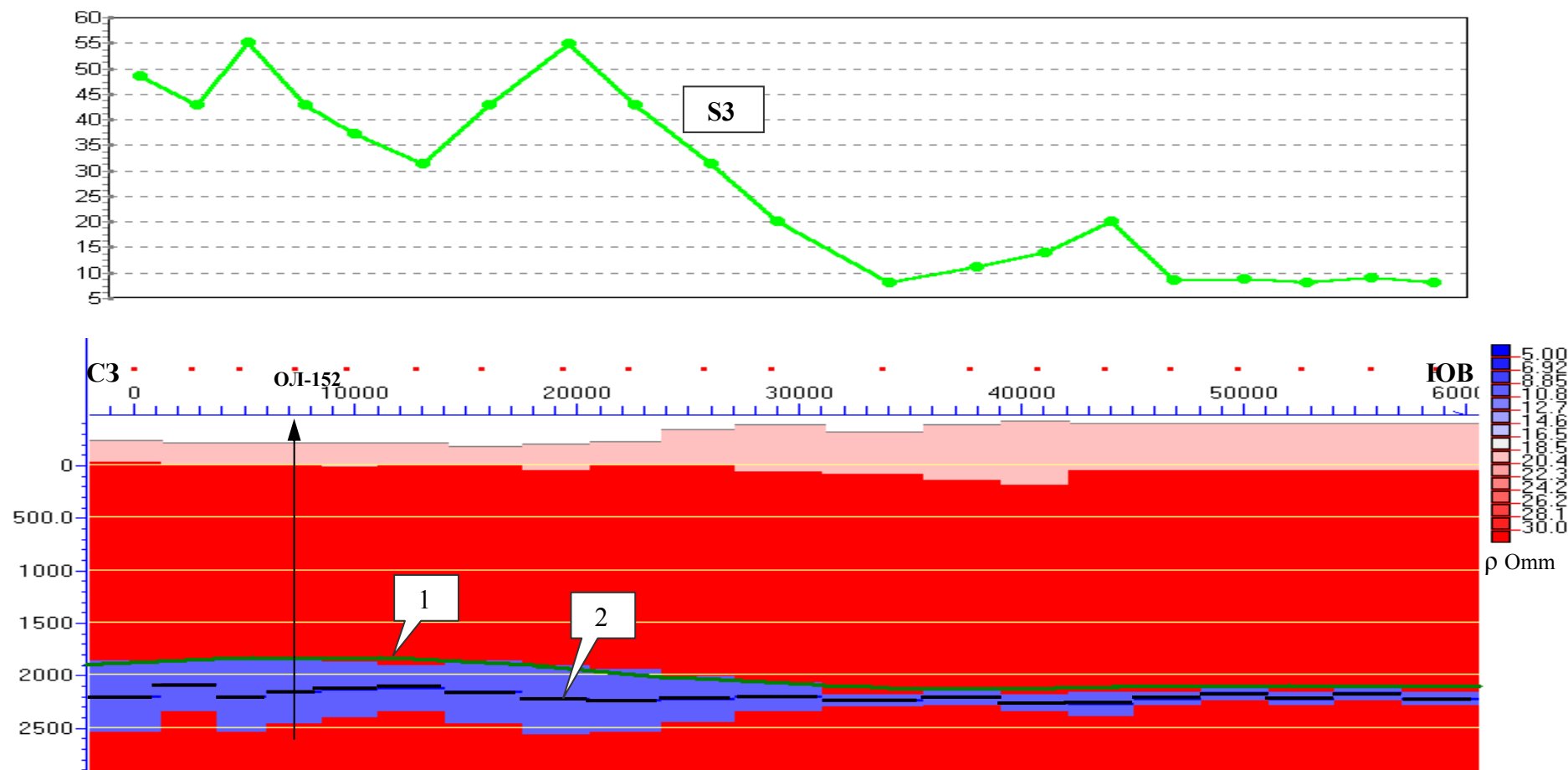


Рис. 3.17. Результаты ЗСБ при картировании вендского терригенного коллектора.  
Нижне – Оленчминская площадь, юго-западный склон Приенисейского прогиба.

- S3 график продольной проводимости проводящей толщи.
- 1 горизонт “М” по ОГТ, кровля терригенных отложений венда.
- 2 глубина залегания середины проводящей толщи.

## Заключение

Сейчас можно констатировать, что система Подбор является наиболее признанным математическим обеспечением для зондирований в ближней зоне в России и в странах СНГ. Причины этого самые простые и основательные. Прежде всего, упорная работа одного и того же коллектива на протяжении более 15 лет. Этот коллектив оказался самодостаточным в важнейших составляющих, необходимых для развития и поддержания такого программного продукта – методика, математика и компьютерная реализация. В то же время всех авторов можно назвать профессионалами-электроразведчиками, постоянно и прямо участвовавшими в живой методической работе для ЗСБ в контакте с разработчиками аппаратуры для ЗСБ и пользователями – полевыми геофизиками.

За эти годы система Подбор так или иначе применялась и применяется, кроме России, еще во многих других странах: Казахстан, Украина, Белоруссия, Армения, Англия, Франция, Израиль, Италия, Южная Корея, Австралия, Ангола, Йемен, Перу.

История системы Подбор, конечно, тесно связана с судьбой электроразведки методом ЗСБ. Были времена широчайшего ее применения, были спады. Система Подбор развивалась по мере развития этого метода. Развитие это нельзя назвать стремительным. Весьма раздражающим обстоятельством является крайне медленное внедрение трехмерного подхода. Этому есть более субъективные причины (малодоступность соответствующего матобеспечения, дороговизна производства работ по специальным «трехмерным» методикам), есть и объективная причина – сами физические основания ЗСБ, по которым в поздней стадии мы имеем генерализованный (в том числе и по латерали) отклик, преимущественно одномерного характера. Однако если трехмерный подход не будет освоен, ЗСБ ожидает сужение области применения. Поэтому дальнейшее развитие системы Подбор видится именно в направлении трехмерной инверсии. Здесь возможны два пути. Первый состоит в использовании процедуры решения прямой трехмерной задачи для подбора определенным образом параметризованной трехмерной неоднородности. Здесь не требуется большого количества данных (измерений), но должна использоваться весьма значительная априорная информация. Другой подход состоит в прямой инверсии (без явного решения прямой задачи) большого количества данных на основе приближенного линеаризованного представления прямой задачи. Такая процедура легко укладывается в рамки томографической инверсии. Мы намерены развивать именно томографический подход.

Наконец, разработчики системы Подбор должны учитывать, что геофизики по разным соображениям модифицируют методики электроразведки в связи также и с возникновением новых технических средств. Появились компактные индукционные датчики (что позволяет регистрировать и горизонтальные компоненты), применяются магнитометры (сквиды). Освоена точная спутниковая привязка во времени и пространстве. На основании опыта создания, развития и эксплуатации системы Подбор уже сейчас предложена совершенно универсальная система прямого одномерного моделирования для любой (с заземляемым или незаземленным источником) модификации ЗС – система «Выбор-ЗС».

## Литература

- [1] Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям: Пер. с англ. М.: Наука, 1979. 830 с.
- [2] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров: Пер. с фр. М.: Наука, 1967.
- [3] Ваньян Л.Л. Основы электромагнитных зондирований. - М.: Недра, 1965. - 109 с.
- [4] Гольдман М.М., Могилатов В.С. Становление поля вертикального электрического диполя, погруженного в горизонтально - слоистое полупространство // Теория и опыт применения электромагнитных полей в разведочной геофизике.- Сб. научных трудов ИГиГ СО АН СССР. - Новосибирск, 1978, - С. 123-138.
- [5] Градштейн И.С., Рыжик М.М. Таблицы интегралов, сумм и рядов и произведений. - М.: Наука, 1971. - 1108с.
- [6] Дмитриев В.И. Общий метод расчета электромагнитного поля в слоистой среде // Вычислительные методы и программирование. - 1968. - Вып. 10.
- [7] Дмитриев В.И., Скугаревская О.А., Фролов П.П. Некоторые вопросы метода становления поля в ближней зоне.- М.: МГУ, 1973. - 50 с.
- [8] Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
- [9] Захаркин А.К., Тарло Н.Н., 1999. Проблемы метрологического обеспечения структурной импульсной электроразведки. // Геофизика. - 2000. - № 3. - С. 34-39.
- [10] Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Пер. с нем.- М.: Наука, 1976. - 576 с.
- [11] Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть2. Электромагнитные поля: Пер. с англ. М.: Недра, 2000, 482 с.
- [12] Методические рекомендации по электроразведочным работам методом ЗСБ с аппаратурой "Цикл-2" (СНИИГГиМС), Новосибирск, 1981.
- [13] Могилатов В.С. Поздняя стадия становления электромагнитного поля, возбуждаемого погруженным электрическим диполем // Изв.АН СССР. Сер.: Физика Земли. - 1976. - N8. - С. 103-107.
- [14] Могилатов В.С. Об одном способе решения основной прямой задачи электроразведки ЗС // Геология и геофизика. 1993. \ N3. С. 108 - 117.
- [15] Могилатов В.С. Индуктивный, смешанный и гальванический источники в электроразведке становлением поля // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1997.- N12. - С. 42-51.
- [16] Могилатов В.С. Возбуждение электромагнитного поля в слоистой Земле горизонтальным токовым листом // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1998. N5. С. 45 - 53.
- [17] Могилатов В. С. Импульсная электроразведка. - Новосибирск. Изд. Новосиб. Гос. Ун-т. - 2002. - 208 с.
- [18] Могилатов В.С., Злобинский А.В. Математическое обеспечение индуктивной импульсной электроразведки // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2006. - Том VI, N 1(13). - С. 77-87.

- [19] Порохова Л.Н. Ковтун А.А. Исследование эффективности интерпретации экспериментальных кривых МТЗ, Прикладная геофизика. Вып 61, М, Недра, 1970.
- [20] Рабинович Б.И., Могилатов В.С. Становление поля погруженного вертикального магнитного диполя // Геология и геофизика. - 1981. - N3. - С. 88-100.
- [21] Рамапрасад Рао И.Б., Каменецкий Ф.М., Макагонов П.П., Мухина Н.И. Переходный процесс от двух горизонтальных тонких пластов // Прикладная геофизика.- 1976.- Вып. 82.
- [22] Светов Б.С., Губатенко В.П. Аналитические решения электродинамических задач. - М.: Наука, 1988. - 344с.
- [23] Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. - Саратов: Изд. Нижневолжского НИИГиГ, 1969. - 68 с.
- [24] Скугаревская О.А. О конечной стадии процесса становления электрического тока в слое, лежащем на идеально проводящем основании // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. - 1951. - N6. - С. 37-49.
- [25] Скугаревская О.А. Расчет конечной стадии процесса становления электрического поля в трехслойной среде // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. - 1959. - N 1. - С. 59-72.
- [26] Смайт В. Электростатика и электродинамика.- М.: ИЛ, 1954.
- [27] Табаровский Л.А. Применение метода интегральных уравнений в задачах геоэлектрики. - Новосибирск: Наука, 1975.
- [28] Табаровский Л.А., Соколов В.П. Программа расчета нестационарного поля дипольных источников в горизонтально-слоистой среде (АЛЕКС)// Электромагнитные методы геофизических исследований. - Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1982. - С. 57-77.
- [29] Табаровский Л.А., Эпов М.И., Антонов Е.Ю. Электромагнитное поле в средах со слабонегоризонтальными границами. Новосибирск, 1988. - 22 с. - Деп. ВИНТИ 18.07.88. N 6258-B88.
- [30] Табаровский Л.А., Эпов М.И. Дискретные спектры в задачах дифракции нестационарного поля на пленках Шейнмана // Изв.АН СССР. Сер.: Физика Земли. - 1998. - N 9. - С. 46-54.
- [31] Табаровский Л.А., Эпов М.И. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов, Геология и геофизика, т.47, 2006.
- [32] Табаровский Л.А., Эпов М.И., Сосунов О.Г. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократных наблюдений, Новосибирск, 1985.
- [33] Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в однородном проводящем полупространстве // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. - 1946. - Т.Х, N 3. - С. 213-231.
- [34] Тихонов А.Н. О становлении электрического тока в неоднородной слоистой среде // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геоф. - 1950. - Т.XIV, N3. - С. 199-222.
- [35] Тихонов А.Н., Скугаревская О.А. О становлении электрического тока в неоднородной среде. II // Изв. Ан СССР. Сер. геофиз. - 1950. - Т. XIV. - №4.
- [36] Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм: Пер. с англ. М.: Недра, 1987. 235 с.
- [37] Фролов П.П. Об асимптотическом поведении становления поля в слоистой среде // Изв. РАН. Сер.: Физика Земли.- 1965.- N1.
- [38] Шейнман С.М. Об установлении электромагнитных полей в Земле. // Прикладная геофизика, М.: Гостоптехиздат. - 1947. - Вып. 9.

- [39] Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. - Новосибирск: Изд. ОГТИМ СО РАН, 1992. - N 2. - 31 с.
- [40] Эпов М.И., Ельцов И.Н. Релаксация электромагнитного поля дипольного источника в проводящем слоистом пласте, погруженном в изолятор // Геология и геофизика. - 1991. - N10. - С 126-129.
- [41] Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований, Новосибирск, 1990.
- [42] Anderson W.L. Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transform integrals // U.S. Dept. of Commerce, National Technical Information Service Report PB-242-156 - 1975. - 15 p.
- [43] Anderson W.L. Computer program numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering // Geophysics. - 1979. - V. 44. N 7. - Pp. 1287-1305.
- [44] Anderson W.L. Computation of Green's tensor integrals for three-dimensional electromagnetic problems using fast Hankel transforms // Geophysics. - 1984. - V. 49. N 10. - Pp. 1754-1759.
- [45] Anderson W.L. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling // Geophysics. - 1989. - V. 54. N 2. - Pp. 263-266.
- [46] Goldman, M., 1990. Non - conventional methods in geoelectrical prospecting. Ellis Horwood Ltd., 153pp.
- [47] Goldman M., du Plooy A. and Eckard M. On reducing ambiguity in the interpretation of transient electromagnetic sounding data, Geophysical Prospecting, 1994, 42, 3 – 25.
- [48] Levenberg K.A. Method for solution of certain nonlinear problems in least squares // Quart. Appl. Math. - 1944. - v. 2. - Pp. 164-168.
- [49] Marquardt O.W. An algorithm of least squares estimation of nonlinear parameters // J. Soc. Indust. Appl. Math. - 1963. - v. 11. - Pp. 431-441.
- [50] Prácser E. Fast computing of transient electromagnetic field on the surface of a layered half-space // Geofiz. kozl. - 1992. - 37, N 2-3. - Pp. 159-176.