

МГУ им. М.В. Ломоносова  
Геологический факультет  
Кафедра геофизики

Аппаратурно-методический практикум по курсу  
электроразведки.

Лабораторная работа на тему:  
МЕТОД ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ  
ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ (ЗСБ)  
2002 г.

Физические основы метода зондирования становлением поля.

Зондирование становлением поля – метод электромагнитного зондирования, основанный на изучении *поля переходных процессов*, которое возбуждается в земле при импульсном переключении тока в источнике.

Метод зондирования становлением поля относится к методам с искусственным (контролируемым) источником. В качестве *источника* могут использоваться горизонтальный электрический диполь (заземленная электрическая линия АВ) или вертикальный магнитный диполь (незаземленная токовая петля Q). В качестве *приемника* также используются либо заземленная электрическая линия (MN), либо незаземленная петля (q). В данной задаче, как в качестве источника, так и в качестве приемника используется петля.

Для возбуждения поля переходных процессов необходимо создать *импульсное переключение тока в питающей (генераторной) петле*. Стандартными *импульсными сигналами* являются:

- 1) Кратковременный импульс бесконечно большой амплитуды, описываемый  $\delta$ -функцией Дирака;

$$I(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}$$

- 2) Импульс включения, описываемый  $\sigma$ -функцией Хэвисайда;

$$I(t) = I_0 \sigma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ I_0, & t > 0 \end{cases}$$

- 3) Импульс выключения, описываемый  $\sigma$ -функцией Хэвисайда;

$$I(t) = I_0(1 - \sigma(t)) = \begin{cases} I_0, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$$

Создать токовый импульс, который удовлетворительно описывается  $\delta$ -функцией Дирака, сложно, поэтому на практике обычно используют ступенчатое возбуждение поля.

При мгновенном переключении силы тока в питающей петле (в частности при мгновенном выключении тока) измеряемое в приемной петле напряжение спадает до нуля не мгновенно, а постепенно исчезает, изменяясь достаточно сложным образом (рис.1).

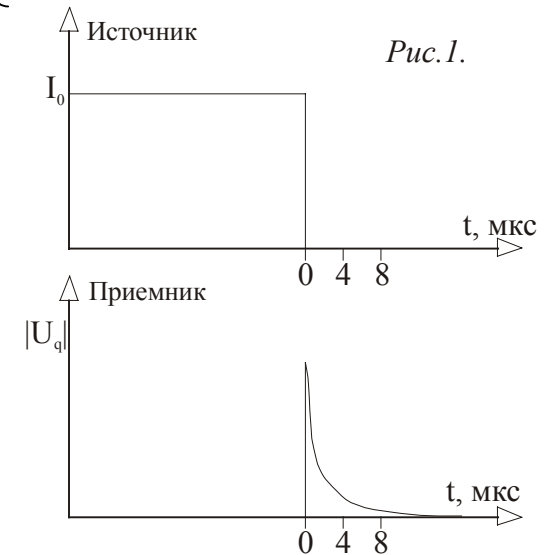


Рис.1.

Это объясняется тем, что в момент выключения тока в проводящих областях разреза индуцируются вторичные токи (рис.2). Переменное магнитное поле вторичных токов индуцирует в приемной петле (q) ЭДС, обозначаемую  $\mathcal{E}_q$ . Причем ЭДС в приемной петле пропорционально скорости изменения магнитного потока.

$$|U_q| = |\mathcal{E}_q| \sim \left| -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|$$

В начальный момент времени (на малых временах измерения после переключения тока в питающей петле), вторичные токи распределяются в приповерхностной части разреза. Затем, с течением времени, (на больших временах измерения после переключения тока в питающей петле) токи начинают проникать в более глубокие слои, затухая с удалением от источника. Этот процесс носит название *становления поля в земле*, а зависимость напряжения в измерительной петле от времени, прошедшего с момента переключения тока в питающей петле, - *кривой становления поля*.

Таким образом, глубина проникновения поля переходных

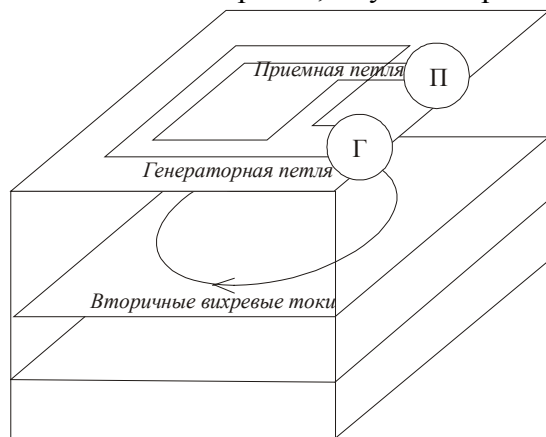


Рис.2.

процессов в землю определяется временем, прошедшим с момента выключения тока в генераторной петле, которое называется *временем задержки* или *временем становления*. Это свойство позволяет проводить зондирование, изучая зависимость компонент измеряемого электромагнитного поля от времени задержки.

### Теоретические основы метода зондирования становлением поля.

Решение задачи о становлении поля в однородном горизонтально слоистом разрезе было получено на основе *квазистационарной модели распространения электромагнитного поля* (т.е. без учета токов смещения в системе уравнений Максвелла). Полученные аналитические выражения для напряженности магнитного и электрического поля переходных процессов зависят от:

- расстояния от приемника до источника ( $r$ );
- времени становления ( $t$ );
- электрических свойств разреза (сопротивление).

Рассмотрим еще одну особенность процесса становления поля, которая относится к *механизму распространения поля вторичных токов*.

Для этого введем понятие *ближней и дальней зоны* неустановившегося электромагнитного поля. Это разделение производится с использованием параметра становления  $\tau = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot 10^7 \cdot \rho \cdot t}$  и приведенного расстояния  $r/\tau$ .

Условие дальней зоны :  $r/\tau \gg 1$ ,

Условие ближней зоны :  $r/\tau \ll 1$ .

После мгновенного переключения тока в источнике возбуждение в каждую точку среды передается двумя способами:

- 1) По воздуху с мгновенной скоростью, без поглощения (т.к. воздух – изолятор). При этом механизм амплитуда поля убывает с удалением от источника за счет геометрического затухания. Поле с плоским фазовым фронтом проникает вертикально в землю одновременно во всех точках, поэтому можно считать, что распространяется плосконеоднородная волна. На достаточно большом расстоянии от источника или на очень малых временах задержки этот механизм является преобладающим.

2) По земле с поглощением и конечной скоростью, определяемыми проводимостью разреза. Этот механизм можно описать как процесс диффузионного распространения вторичных вихревых токов, которые равномерно распределяются в пространстве с течением времени. При этом интенсивность вторичных вихревых токов с удалением от источника убывает. Наглядным примером данного механизма распространения поля может служить растворение капли чернил в воде.

Таким образом, две части поля оказываются разнесенными во времени и пространстве. Первый механизм распространения является определяющим для дальней зоны, а второй механизм – для ближней зоны.

Рассмотрение поля становления в дальней и ближней зонах позволяет сделать ряд упрощений в формулах для напряженностей магнитного и электрического полей. Для этого переходят к пределам:

$npu \ t \rightarrow 0$  и  $r \rightarrow \infty$ , для дальней зоны

$npu \ t \rightarrow \infty$  и  $r \rightarrow 0$ , для ближней зоны.

Использование упрощенных формул дает значительные методические преимущества, но при измерениях необходимо достаточно точно соблюдать условия ближней и дальней зоны. При этом, надо учитывать, что некоторые диапазоны времен и расстояний попадают на промежуточную зону, где использование приближений дальней и ближней зон является некорректным.

### Задачи, решаемые методом ЗСБ, преимущества метода.

Метод зондирования становлением поля в ближней зоне на сегодняшний день с успехом применяется для решения следующих задач:

- ✓ поиск рудных тел;
- ✓ гидрогеологические исследования;
- ✓ геолого-структурные исследования.

Основные преимущества метода ЗСБ:

- ✓ большая глубинность;
- ✓ высокая детальность получаемого разреза;
- ✓ точная привязка «точки записи»;
- ✓ высокая производительность работ;
- ✓ хорошая помехоустойчивость.

### Установки, используемые в ЗСБ.

При полевых работах методом ЗСБ обычно применяются установки «АВ-петля» (АВ-q) и «петля-петля» (Q-q). Частными случаями установки Q-q являются: установка «петля в петле» с соосными петлями (рис. 3), установка с совмещенными приемной и генераторной петлями, однопетлевая установка. Все разновидности установки Q-q широко распространены из-за высокой производительности работ, локальности исследований и определенности местонахождения «точки записи», то есть точки земной поверхности, к которой относятся результаты измерений.

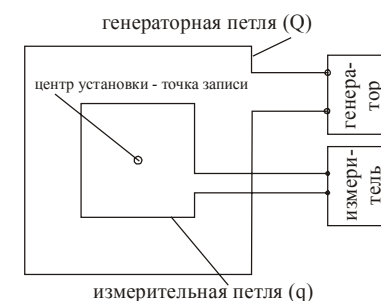


Рис. 3. Схема установки «петля в петле».

### Особенности аппаратуры ЗСБ.

К аппаратуре, применяемой для измерения становления поля в ближней зоне, предъявляются следующие требования:

- ✓ большой динамический диапазон, связанный с необходимостью измерения сигнала, различающегося на 5-6 порядков;
- ✓ большая чувствительность и помехоустойчивость, так как улучшение детальности и производительности работ методом ЗСБ связано с уменьшением размеров петель, а значит и с уменьшением уровня измеряемого сигнала.

### Аппаратура TEM-FAST 48.

В данной лабораторной работе предоставляется возможность ознакомления с аппаратурой TEM-FAST (производитель – компания AEMR ltd.).

#### Устройство TEM-FAST 48.

Аппаратурный комплекс TEM-FAST включает в себя:

- ✓ генератор однополярных прямоугольных импульсов;
- ✓ измерительный блок, обеспечивающий регистрацию сигналов;
- ✓ управляющий блок;

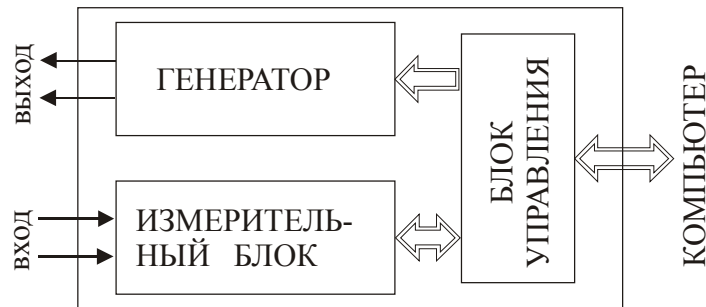


Рис. 4. Блок-схема TEM-FAST 48.

- ✓ внутренний источник питания 12В.

Все устройства собраны в одном корпусе. На рисунке 4 показана схема TEM-FAST.

**Генератор** вырабатывает прямоугольные однополярные импульсы тока, которые пропускаются через генераторную петлю. Соотношение импульс/пауза = 3/1 (рис. 5), что обеспечивает минимальную погрешность, вызванную наложением переходных процессов от фронта включения и выключения тока в генераторной петле.

Следует отметить, что идеальный и реальный импульс тока отличаются, так как в действительности петля представляет собой инерционную электрическую систему. В момент выключения тока (наиболее важный

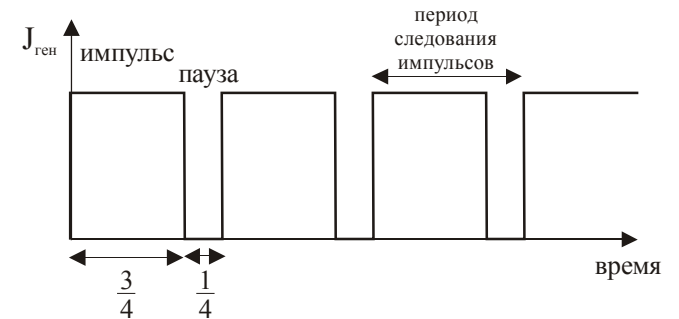


Рис. 5. Идеальные однополярные импульсы тока, подаваемого в генераторную петлю с соотношением импульс/пауза = 3/1.

для измерения переходных процессов) ток в генераторной петле резко отличается от идеального, в связи с этим наблюдается (иногда довольно сильное) искажение результатов измерения на малых временах после выключения тока.

Возможные токовые режимы работы генератора - 1А и 4А. Величина тока указывается условно и зависит от сопротивления генераторной петли. В процессе измерения осуществляется измерение реальной амплитуды токовых импульсов, на которую затем нормируется ЭДС в приемной петле.

*Основные технические характеристики:*

- время выключения токового импульса от 4 мкс (в зависимости от размеров петли);
- амплитуда токовых импульсов от 1 А;
- активное сопротивление нагрузки не более 20 Ом.

**Измерительный блок** состоит из:

- *устройства защиты от высокого входного напряжения* (High Voltage Protection или HVP): на малых временах задержки сигнал в приемной петле может быть очень большим и выходить за рамки динамического диапазона. Устройство защиты от высокого входного напряжения «гасит» поступающее на вход напряжение. Оно может работать в трех режимах : 1. автоматического ограничения напряжения по уровню 10 В, 2. заданного оператором времени защиты (т.е. выбором минимального времени задержки, с которого начинается измерение кривой), 3. автоматически заданного времени защиты, определяемого размером установки и силой тока в генераторной петле.

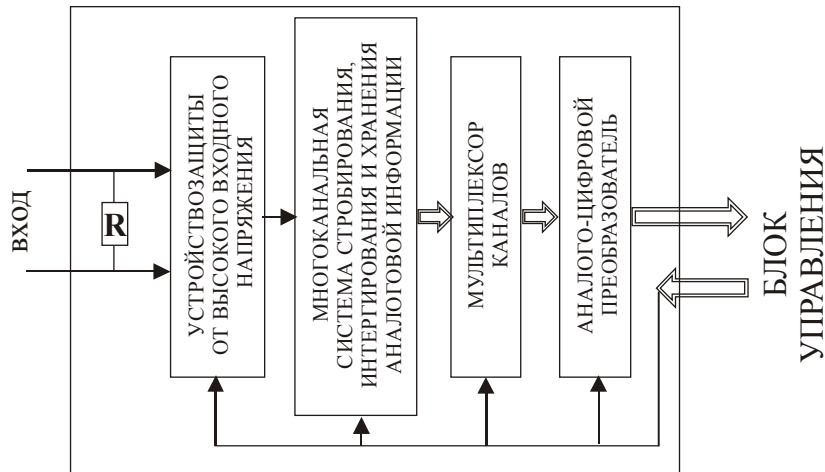


Рис. 6. Блок-схема измерительного блока TEM-FAST 48.

- многоканальной системы стробирования, интегрирования и хранения аналоговой информации, где каждый канал отвечает аппаратно определенному времени задержки. С ее помощью происходит аналоговое накопление сигнала на каждом времени задержки. В TEM-FAST кривая спада, характеризующая переходный процесс, измеряется с достаточно частым шагом по временам задержек (48 времен от 4 мкс до 16 мс);
- мультиплексора каналов, который после окончания процессов аналогового накопления последовательно подключает выходы каждого канала к АЦП;
- аналого-цифрового преобразователя, который преобразует аналоговый сигнал в цифровой код и передает его в управляющий блок.

Блок-схема измерительного блока представлена на рис. 6.

Важной проблемой при геофизических измерениях различными методами являются промышленные помехи. Борьба с промышленными помехами осуществляется двумя способами – фильтрацией и накоплением.

Первый способ дает хорошие результаты, если помеха гармоническая и известна ее частота. Тогда сигнал, поступающий на вход измерителя, пропускается через аналоговый или цифровой (в зависимости от особенностей аппаратуры) режекторный фильтр, настроенный на частоту помехи. Режекторным называется узкополосный фильтр, «вырезающий» определенную частоту. Тем самым помеха подавляется. Однако, применение процедуры фильтрации искажает форму сигнала и мы не можем с достаточной точностью учесть эти изменения. Это вносит большие погрешности в результаты измерений кривой становления. Поэтому в методе ЗСБ фильтрация практически не применяется.

Второй способ борьбы с помехами, накопление, сводится к тому, что мы посылаем в генераторную петлю не одиночный им-

пульс тока и производим измерения кривой становления поля после его выключения, а посылаем серию импульсов и после каждого из них производим измерения. Показано, что гармоническая помеха подавляется наилучшим образом если период повторения импульсов  $T = (k+1/2)*T_{\text{пом}}$ , где  $k$  может принимать значения 0, 1, 2, 3 и т.д., а  $T_{\text{пом}}$  – период помехи. Подобным образом производится подавление промышленной помехи в приборе TEM-FAST 48.

*Основные технические характеристики:*

- количество автоматически регистрируемых задержек - 48;
- минимальное значение времени задержки 4.06 мкс;
- максимальное значение времени задержки 15304 мкс (15 мс);
- динамический диапазон 140 дБ;
- чувствительность (минимальный регистрируемый сигнал)  $10^{-6}$  В (1 мкВ);
- подавление промышленных помех (50 Гц/60 Гц) не менее 60 дБ;
- измеряемые величины – ЭДС/ток, единицы измерения – В/А;
- время измерения единичной кривой от 10 секунд до 4 минут 30 секунд;
- разрядность АЦП 16 бит, разрешение 1 мкВ.

**Управляющий блок** предназначен для управления всеми процессами измерений и передачей информации в компьютер.

На лицевой панели прибора находится три разъема, промаркированные:

**Tr-Rec loops** - подключение с помощью переходника передающей и приемной петель;

**RS 232** – соединение с COM портом компьютера;

**Extern power** – подключение внешнего питания – аккумуляторов 12 В или 24 В, а также зарядка внутренних батарей.

Управление TEM-FAST осуществляется с любого IBM-совместимого компьютера при помощи специальной управляющей программы (TEM-48Win или TEM48Dos). При полевых исследованиях целесообразно использовать компьютер класса NoteBook.

### Обработка данных ЗСБ.

Обработка данных ЗСБ заключается в пересчете полученных на различных временах задержки значений приведенной ЭДС в значения кажущегося сопротивления. Кажущееся сопротивление в методе ЗСБ обозначается  $\rho_{\tau}$ . Пересчет производится по формуле:

$$\rho_{\tau}(t) = \frac{\mu_0}{\pi * t} * \left[ \frac{Q * q * \mu_0}{20 * t * E(t)} \right]^{\frac{2}{3}},$$

где  $Q$  и  $q$  – эффективные площади генераторной и приемной петель (т.е. с учетом количества витков) –  $m^2$ ,  $t$  – время становления – с,  $E(t)$  – приведенная ЭДС – В/А,  $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Напомним, что графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс в методе ЗСБ принято откладывать параметр  $\sqrt{2 * \pi * t}$ .

### Методы интерпретации кривых ЗСБ.

Как и в других методах электроразведки, в методе ЗСБ основным методом интерпретации кривых зондирования является метод подбора. Метод подбора заключается в последовательном изменении геоэлектрической модели разреза и расчете прямой задачи для нее до тех пор, пока экспериментальная и теоретическая кривые не совпадут с требуемой точностью.

Однако существуют более простые методы, с помощью которых можно оценить количественные параметры модели: суммарную мощность до кровли проводников ( $H$ ) и суммарную продольную проводимость до кровли изоляторов ( $S$ ). Расчет этих параметров для установки «петля в петле» и для однопетлевой установки производится по формулам:

$$S = 452 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}}}{\sqrt{\rho_{\tau \min}}}$$

$$H = 360 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}} \cdot \sqrt{\rho_{\tau \min}}$$

, где  $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t_{\min}}$  – абсцисса минимума кривой кажущегося сопротивления, а  $\rho_{\tau \min}$  – его ордината (рис.7).

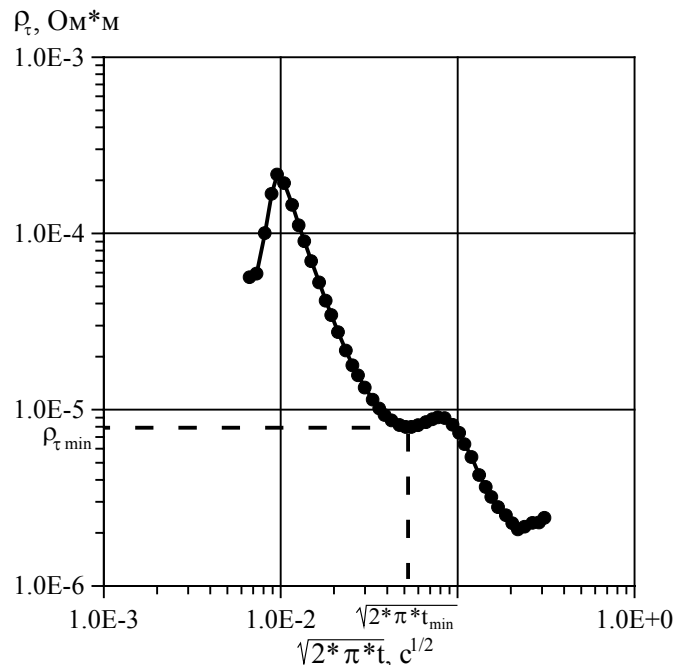


Рис. 7. Кривая кажущегося сопротивления ЗСБ.

### Описание лабораторной работы.

Задачей данной работы является ознакомление с различными методиками ЗСБ и аппаратурой TEM-FAST 48.

Необходимо провести измерения кривой становления поля на поверхности модели среды с соосной двухпетлевой установкой «петля в петле» и с однопетлевой установкой, проанализировать характер разреза, вид кривых ЗСБ и провести количественную интерпретацию полученных кривых.

В данной работе используются многовитковые петли из медного провода, имеющие следующие параметры:

однопетлевая – размер петли 4 см\*4 см, число витков 100;

двухпетлевая – размер генераторной петли 10 см\*10 см, число витков – 46, размер измерительной петли 4 см\*4 см, число витков 35.

### Последовательность операций при выполнении работы.

1. создать модель в соответствии с вашим вариантом.
2. подсоединить прибор к компьютеру и петли к прибору.
3. запустить программу TEM48Dos.exe из каталога C:\TEM\_FAST\. При этом на экране возникает главное окно программы, показанное на рисунке 8. Требуется заполнить все пункты меню, описанные ниже.

**Set name** – имя точки зондирования. *Вписать через тире размеры генераторной и измерительной петель в см, буквенное обозначение модели и номер варианта (например : 4-4a1).*

**Site name** – название площади, профиля или ближайшего населенного пункта (можно не заполнять).

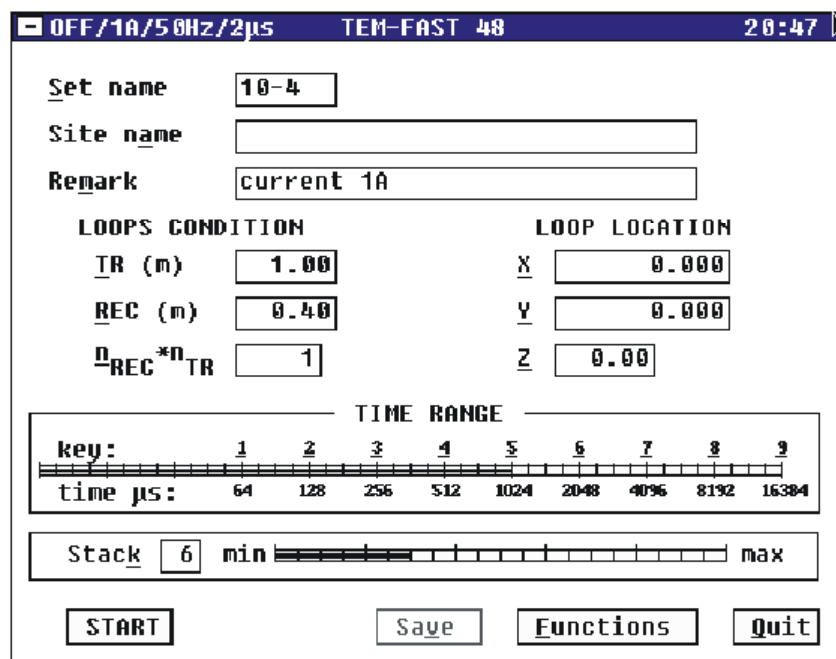


Рис. 8. Главное окно программы TEM48DOS.exe

**Remark** – произвольный комментарий (можно не заполнять).

**LOOPS CONDITION** – информация о петлях:

**Tr** – размер генераторной петли в м,

**Rec** – размер измерительной петли в м,

$n_{rec} * n_{tr}$  – произведение числа витков генераторной петли на число витков измерительной петли

Поставить эффективные значения размеров петель  $l_{эф} = \sqrt{l^2 \cdot n}$ .

**Stack** – код цифрового накопления сигнала (1-20). Каждой единице параметра Stack соответствует 5 циклов аналогового накопления. Увеличение накопления с помощью параметра Stack улучшает результат измерения только в том случае, когда помеха близка к

«белому шуму» или ее чистота кратна 50 Гц. Установить параметр *Stack* (щелчок левой кнопкой мыши в требуемом месте полоски) равным 4-8.

**Time Range** – максимальное время задержки, на котором производятся измерения. Установить максимальным (16 мс).

Меню **FUNCTIONS – TOOLS** (рис. 9)

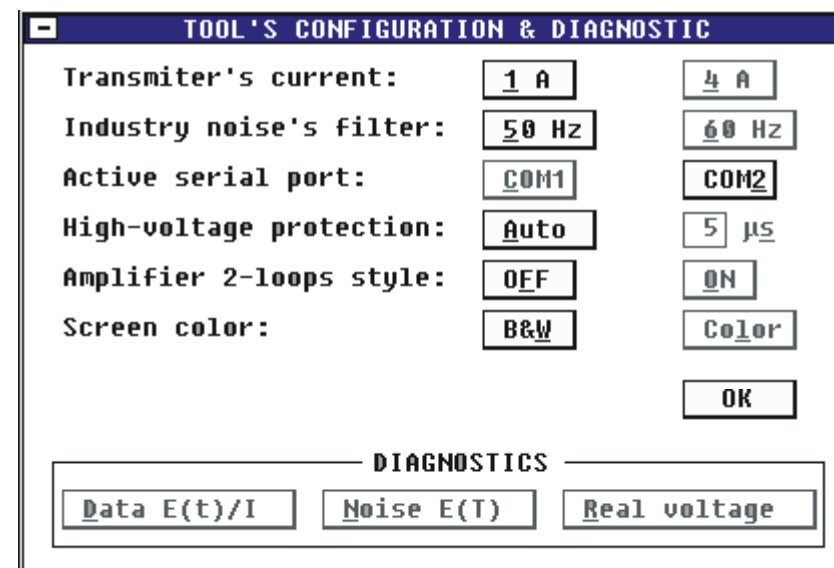


Рис. 9. Окно TOOLS программы TEM48DOS.exe

**TRANSMITTER'S CURRENT** – используемый токовый режим. Выбрать ток 1 А.

**INDUSTRIAL NOISE'S FILTER** – переключатель величины промышленной частоты: 50 Гц (стандартная промышленная частота в России и некоторых других странах) или 60 Гц (стандартная промышленная частота в США и некоторых других странах). Установить равным 50 Гц.



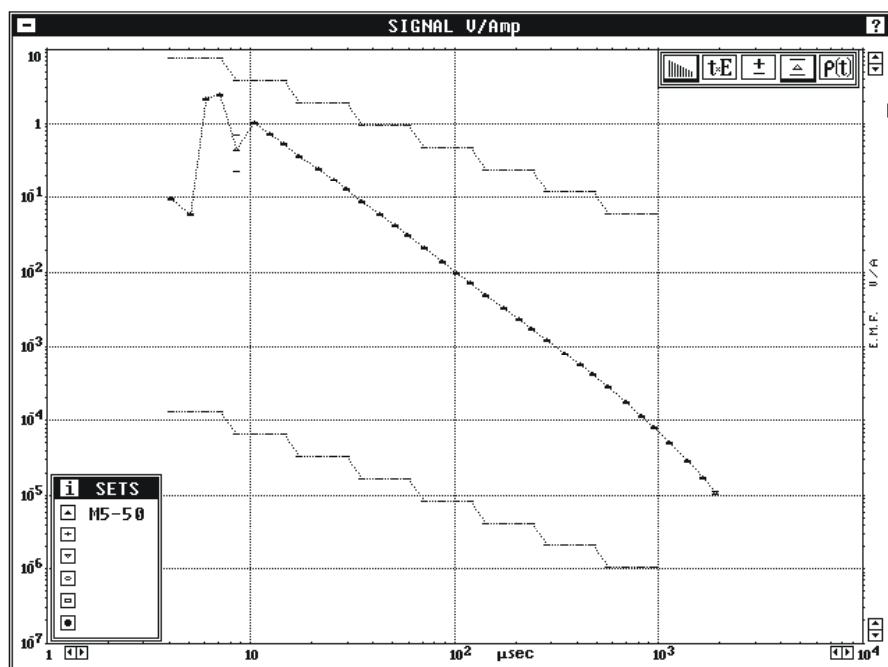


Рис. 10. Окно PREVIEW DATA программы TEM48DOS.exe  
**HIGH-VOLTAGE PROTECTION** – настройка режима работы устройства защиты от высокого входного напряжения. *Выбрать автоматический режим.*

**AMPLIFIER FOR 2-LOOP STYLE** – переключение усиления при работе с 2-петлевыми установками. *Установить «OFF».*

Далее нажатием «OK» (установить настройки) вернуться в главное окно.

4. проверить все настройки – параметры петель, величину тока, значение установленной промышленной частоты (в левом верхнем углу окна программы).
5. запустить измерения, нажав на кнопку «START». При этом в правом верхнем углу загорается индикатор состояния внутрен-

них батарей и начинает заполняться индикатор выполнения процесса (песочные часы).

6. После успешного измерения автоматически открывается окно просмотра кривых **PREVIEW DATA**, вид которого представлен на рисунке 10. Это окно можно также вызвать, нажав кнопки **FUNCTIONS - PREVIEW DATA**.

Предусмотрены следующие основные функции:

- смена режима просмотра кажущегося сопротивления и приведенной ЭДС (кнопка  $\rho(t)$  или  $E(t)$ );
- в режиме просмотра приведенной ЭДС возможен просмотр границ динамического диапазона на каждом времени задержки (первая кнопка слева в правом углу окна);
- просмотр разброса значений (четвертая кнопка слева в правом углу окна);
- окно **Sets** дает информацию о кривых. Графики можно отключать и включать щелчком левой кнопки мыши на соответствующей строке в окне Sets.

7. закрыть окно «PREVIEW DATA» и вернуться в главное окно.
8. после успешного завершения процесса измерения становится активной кнопка «SAVE». Сохранить результаты измерений в файл с именем `br_**.tem` (\*\* - номер бригады). В файл \*.tem с одним и тем же именем последовательно записываются все результаты измерения данной бригады.
9. повторить пункты 1-8 для других моделей вашего варианта.
10. после окончания всех измерений выйти из программы (кнопка «QUIT»).
11. Рассчитать кривые кажущегося сопротивления и построить их. Напомним, что графики кажущегося сопротивления строятся в билогарифмическом масштабе. По оси абсцисс в методе ЗСБ принято откладывать параметр  $\sqrt{2 \cdot \pi \cdot t}$ .

12. Для кривых, полученных с однопетлевой установкой (**модели А и В вашего варианта**) по координатам минимумов определить параметры  $S$  и  $H$ . Получив  $S$ , рассчитать мощности проводников, считая, что изоляторы не дают приращения  $S$  (их удельное сопротивление бесконечно). Напоминаем, что суммарная продольная проводимость однородного слоя рассчитывается по формуле:  $S = h/\rho$ . Удельное сопротивление алюминия, из которого сделаны проводящие слои в модели, составляет  $2.5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .
13. Сравните поведение кривых кажущегося сопротивления, полученных с однопетлевой и двухпетлевой установками (**модели С и D вашего варианта**). В чем они схожи и чем отличаются. Чем вы можете объяснить эти различия.

После выполнения работы (в другой день, согласованный с преподавателем) требуется сдать задачу, т.е. объяснить полученные кривые ЗСБ и параметры модели, полученные в результате их интерпретации. Кроме того, непосредственно перед выполнением работы, а также при ее сдаче, нужно пройти собеседование по данной разработке.

#### Вопросы к задаче.

1. Физические основы метода.
2. Теоретические основы метода.
3. Основные особенности аппаратуры для метода ЗСБ. Установки метода ЗСБ.
4. Основные характеристики аппаратуры TEM-FAST 48.
5. Области применения метода, решаемые геологические задачи, возможные ограничения.
6. Анализ полученных результатов.

#### Литература.

1. В.К. Хмелевской. Электроразведка. Изд-во Московского университета, 1984 г.
2. М.С.Жданов. Электроразведка. М., «Недра», 1986 г.
3. Электроразведка. Справочник геофизика. Книга первая. М., «Недра», 1989 г.