

---

# Метод частотного зондирования с искусственным источником (ЧЗ)

---

**Основы теории,  
аппаратура и методика полевых работ,  
обработка и интерпретация данных**

# Основы метода ЧЗ

- Источники поля:
  - Заземленная линия АВ (горизонтальный электрический диполь)
  - Незаземленная петля Q (вертикальный магнитный диполь)
- Изучаются частотные зависимости:
  - компонент ЭМ поля ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ )
  - отношений ( $Z_{xy} = E_x / H_y$ ,  $Z_{yx} = E_y / H_x$ ) – импедансная модификация метода ЧЗ (методика CSMT)
- Изменение глубинности достигается за счет явления скин-эффекта

# История метода ЧЗ

- Основатели
  - А.П. Краев (автор метода)
  - А.Н. Тихонов (развитие теории)
  - Л.Л. Ваньян (практическое внедрение)
- Предпосылки внедрения в нефтегазовую геофизику
  - Глубинность методов постоянного тока при наличии в осадочном чехле высокоомных экранов ограничена
  - Переменное электромагнитное поле беспрепятственно распространяется сквозь высокоомные среды
- За рубежом развивалась импедансная модификация (CSMT)
  - M.A. Goldstein, D.W. Strangway (University of Toronto), 1971
  - K.L. Zonge (Zonge Inc.), 1977
  - M. Yamashita (Phoenix Geophysics Ltd.), 1984
- Причина появления методики CSMT
  - Низкая амплитуда вариаций естественного (магнитотеллурического) поля при высоком уровне промышленных полей-помех

# Понятия ближней и дальней зон



волновое число

$$k = \sqrt{-i\omega\mu_0\sigma}$$

- Ближняя зона:  $|kr| \ll 1$  (малые  $\omega$ ,  $\sigma$ ,  $r$ )
  - Преобладает часть поля, распространяющаяся в проводящей среде с затуханием
- Дальняя зона:  $|kr| \gg 1$  (большие  $\omega$ ,  $\sigma$ ,  $r$ )
  - Преобладает часть поля, распространяющаяся в непроводящей среде без затухания

# Нормальное поле ГЭД

- В дальней зоне ( $|kr| \gg 1$ )

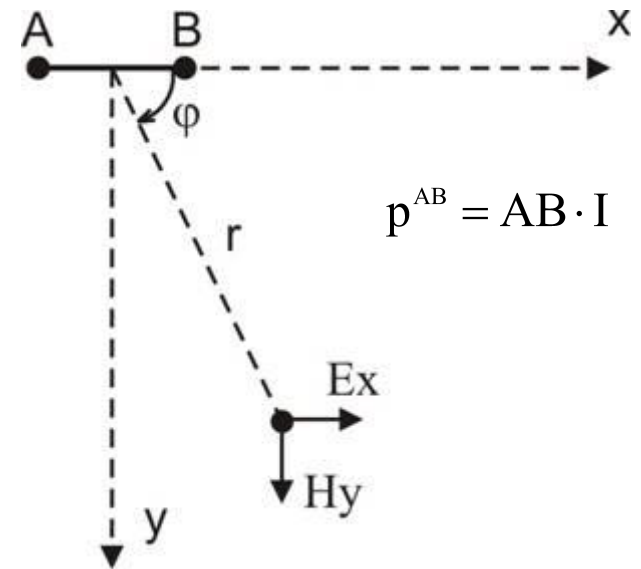
$$E_x = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2 \varphi - 2}{r^3} \cdot \rho \quad H_y = \frac{1}{\sqrt{-i\omega\mu_0}} \cdot \frac{p^{AB}}{2\pi} \frac{3\cos^2 \varphi - 2}{r^3} \cdot \sqrt{\rho}$$

$$H_z = \frac{1}{-i\omega\mu_0} \cdot \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3\sin\varphi}{r^4} \cdot \rho \quad Z = \sqrt{-i\omega\mu_0\rho}$$

- В ближней зоне ( $|kr| \ll 1$ )

$$E_x = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2 \varphi - 1}{r^3} \cdot \rho \quad H_y = -\frac{p^{AB}}{2\pi} \frac{\sin^2 \varphi - 0.5}{r^2}$$

$$H_z = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{\sin\varphi}{2 \cdot r^2} \quad Z = -\frac{3\cos^2 \varphi - 1}{\sin^2 \varphi - 0.5} \frac{\rho}{r}$$



# Выводы по нормальным полям

- В БЗ ( $|kr| \ll 1$ ) большинство компонент поля не зависят от  $\rho$ , и понижение частоты не приводит к увеличению глубинности
- В ДЗ ( $|kr| \gg 1$ ) все компоненты поля зависят от  $\rho$ , а  $Z$  равен импедансу среды в поле плоской волны
- В ДЗ при удалении от источника:
  - АВ- $E_x$  и АВ- $H_y$  убывают как  $1/r^3$
  - АВ- $H_z$ , Q- $E_\phi$  и Q- $H_r$  убывают как  $1/r^4$
  - Q- $H_z$  убывает как  $1/r^5$
- В ДЗ:
  - $E_x$  ( $E_\phi$ ) и  $H_z$  пропорциональны  $\rho$
  - $H_y$  ( $H_r$ ) и  $Z$  пропорциональны  $\sqrt{\rho}$
- В ДЗ по результатам измерения компонент можно определить сопротивление нижнего полупространства. Если оно является неоднородным, получим кажущееся сопротивление.

# О глубинности исследований

- Глубинность определяется двумя факторами
  - частотой
  - разносом

- Толщина скин-слоя 
$$h_{\delta} = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\sqrt{10^7 \rho T}}{2\pi}$$

- Глубины  $h_r > \frac{r}{2 \div 5}$  недоступны (попадаем в БЗ)

- В юго-западной части Московской синеклизы мощность осадочного чехла  $\sim 1$  км, для его изучения необходимы разносы  $\sim 3$  км и более

# Способы возбуждения поля

- Гальванический (точнее, смешанный) – линия АВ
  - Длина от ста метров до первых километров
  - Низкоомный провод
  - «Хорошие» заземления (буровой инструмент)
- Индукционный – петля Q
  - Сторона петли – от ста метров до километра
  - При индукционном возбуждении поле быстро убывает при удалении источника



# Датчики поля

- Датчики электрического поля – линии MN
  - Длина ~ 50 - 500 метров
  - Можно использовать металлические электроды и легкий провод
- Датчики магнитного поля – катушки, петли
  - Петля – для измерения Hz.  
Размер 100 x 100 м, 23 витка
  - Индукционные датчики (МТС-50, АМТС-30 и др.)

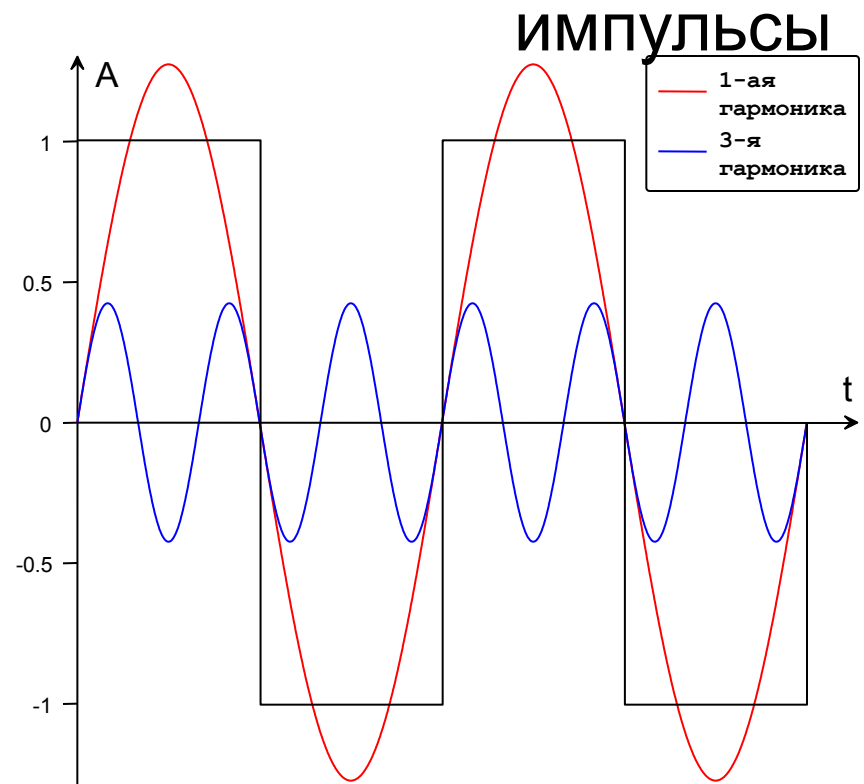
$$\Delta U_{Ex} = |MN| \cdot E_x \quad \varepsilon_{Hz} = \omega \mu_0 n S \cdot Hz \quad \varepsilon_{Hy} = K \cdot Hy$$

# Типы установок

- При использовании АВ наиболее удобны:
  - Экваториальная ( $E_x$ ,  $H_y$  и  $H_z$  максимальны и слабо зависят от азимутального угла)
  - Осевая ( $E_x$  и  $H_y$  максимальны и слабо зависят от азимутального угла, но  $H_z = 0$ )
- При использовании Q:
  - Измеряют компоненты  $E_\phi$ ,  $H_r$  и  $H_z$  (поскольку поле обладает цилиндрической симметрией)

# Форма сигнала

- Сигнал типа «меандр»  
(прямоугольные без паузы)



# Генераторная аппаратура



Phoenix  
TXU-30  
(20 кВт,  
40 А)



Phoenix  
T-200  
(160 кВт,  
160 А)



Zonge GGT-30  
(30 кВт, 45 А)



УГЭ-50 (100 кВт, 100 А)



UCS-02M (150 кВт,  
300 А)

# Измерительная аппаратура



МЭРИ-24



Zonge GDP-32



Phoenix  
MTU,  
MTU-A



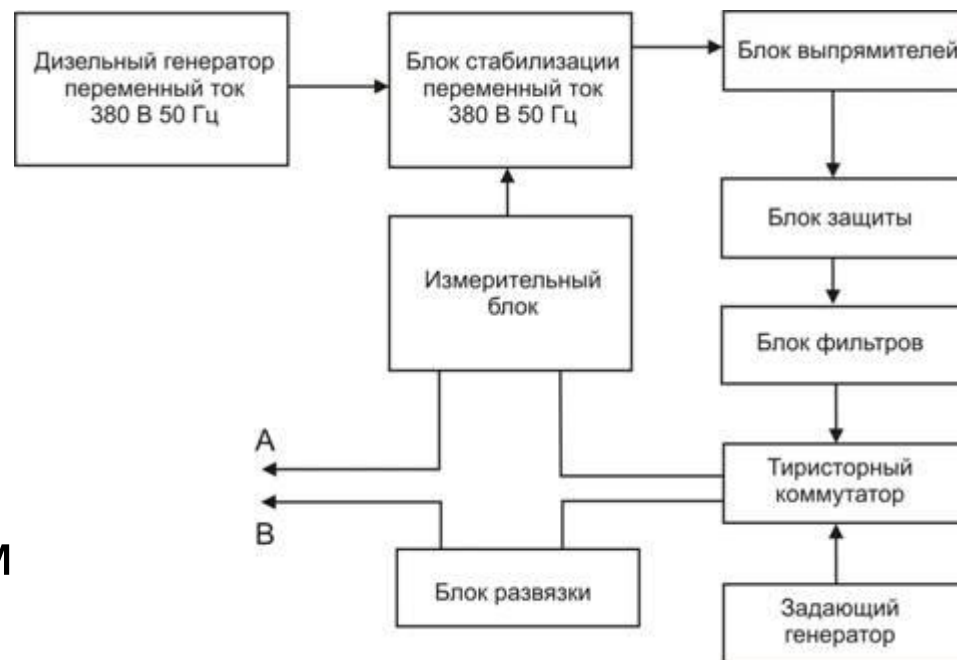
Phoenix V8



AGE-xxl

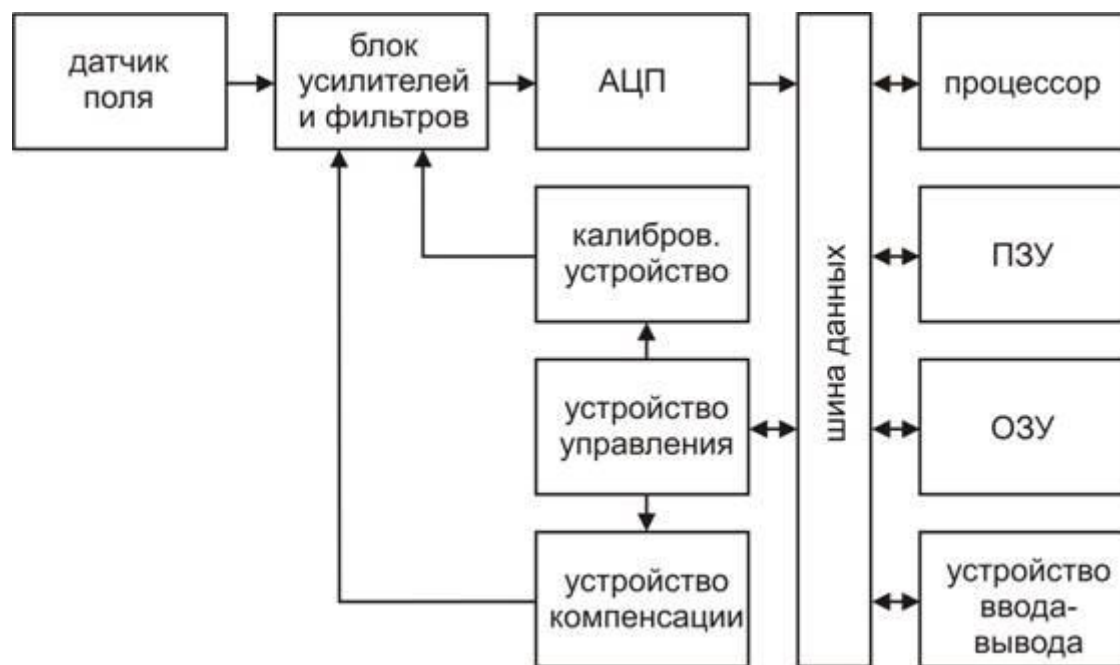
# Генераторная группа УГЭ-50

- Форма сигнала:
  - Меандр (разнополярные импульсы без паузы)
  - Разнополярные импульсы с паузой
- Частоты:
  - от 0.076 до 156 Гц шагом 2)
- Сила тока:
  - до 100 А при нагрузке до 9 Ом
  - до 50 А при нагрузке до 20 Ом



# Измеритель МЭРИ-24

- В режиме «ЧЗ» определяет амплитуду сигнала на 1, 3 и 5 гармониках
- Возможна запись временных рядов в ПЗУ
- Частоты:
  - 0.15 - 625 Гц
- Параметры:
  - $R_{ВХ} > 10 \text{ МОм}$
  - диапазон от -3 до +3 В
  - минимальный сигнал 1 мкВ



# Сравнение МТУ и МЭРИ-24

- Преимущества МТУ:
  - Много каналов
  - Широкий динамический диапазон
  - Высокая чувствительность
  - Автономная работа, углубленная обработка
- Преимущества МЭРИ-24:
  - Настройка коэффициента усиления
  - Настройка фильтров (на рабочую частоту)
  - Настройка частоты оцифровки
  - Сразу виден результат (при измерении)



# Обработка данных ЧЗ

- Задача: получение кривых кажущегося сопротивления, а также фазовых кривых
- Обработка данных МЭРИ-24
  - Обработка временных рядов выполнена в процессе измерения, в камеральных условиях строятся кривые
- Обработка данных МТУ
  - Обработка временных рядов на отдельном компьютере с помощью специального программного обеспечения

# Обработка данных МЭРИ-24

- В процессе измерений:
  - Выполняется калибровка и учитывается ее результат
  - Определяются амплитуды гармоник путем разложения сигнала в ряд Фурье на отрезке длиной  $T$
  - Осуществляется медианное осреднение накопленных результатов для  $N$  периодов
  - Результаты записываются в память и/или на бланк
- В камеральных условиях
  - Пересчет полученных значений разностей потенциалов и ЭДС в кажущиеся сопротивления, построение кривых

# Обработка данных MTU: процедуры

- Подавление низкочастотной составляющей сигнала
  - Вычитание составляющей, частота которой существенно меньше рабочей частоты генератора
- Спектральный анализ
  - Расчет комплексных амплитуд компонент поля путем разложения сигнала на отрезке длиной  $T$  в ряд Фурье
- Робастное осреднение
  - Осреднение результатов обработки по всем отрезкам длиной  $T$
- Учет ЧХ аппаратуры
  - Вводится поправка за частотную характеристику каналов измерителя и датчиков
- Построение амплитудных и фазовых кривых
  - При обработке ЧЗ рассчитываются кажущиеся сопротивления и относительные фазовые параметры
  - При обработке CSMT рассчитываются скалярные импедансы, а при использовании двух источников – компоненты тензора импеданса

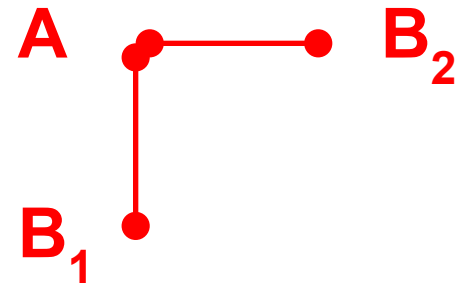
# Об определении $Z_{ij}$

- Скалярные импедансы

$$Z_{xy}^S = E_x/H_y \quad Z_{yx}^S = -E_y/H_x$$

- Компоненты тензора импеданса

$$\begin{cases} E_x^{(1)} = Z_{xx}H_x^{(1)} + Z_{xy}H_y^{(1)} \\ E_y^{(1)} = Z_{yx}H_x^{(1)} + Z_{yy}H_y^{(1)} \\ E_x^{(2)} = Z_{xx}H_x^{(2)} + Z_{xy}H_y^{(2)} \\ E_y^{(2)} = Z_{yx}H_x^{(2)} + Z_{yy}H_y^{(2)} \end{cases}$$

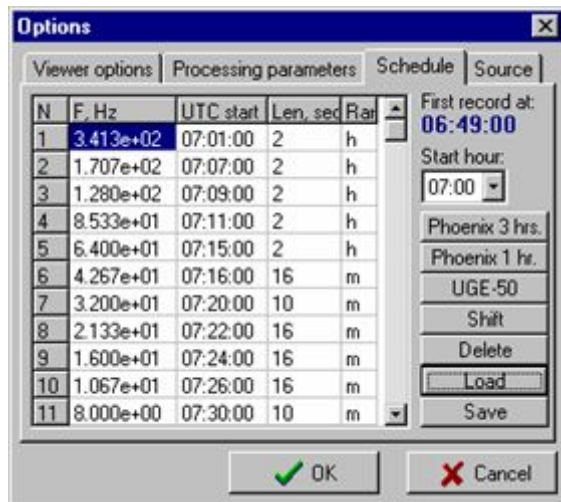


# Обработка данных MTU

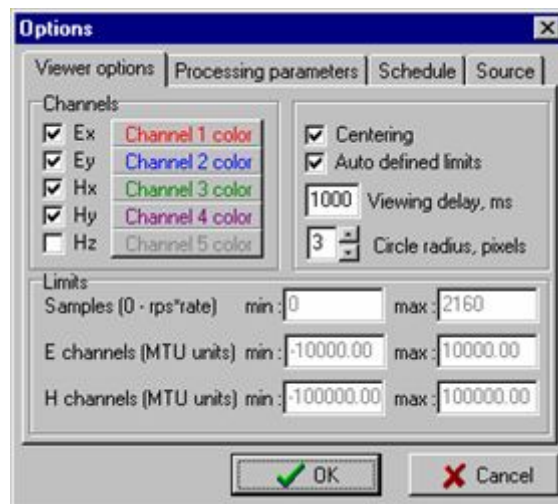
- Программное обеспечение:
  - FSIP-Pro – обработка в режиме ЧЗ
  - CSMT-Pro – обработка в режиме импедансного ЧЗ (CSMT)
- Последовательность работы:
  - Загрузка временных рядов, параметров регистрации задание
  - Просмотр временных рядов
  - Выбор параметров обработки, процесса обработки запуск
  - Просмотр частотных зависимостей, сохранение результатов

# Обработка данных MTU

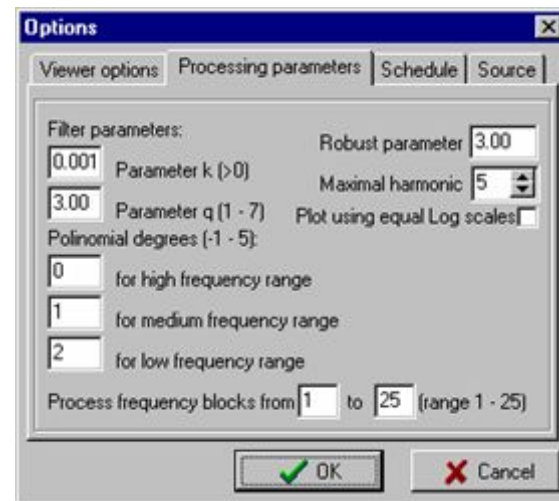
## Выбор параметров...



... регистрации



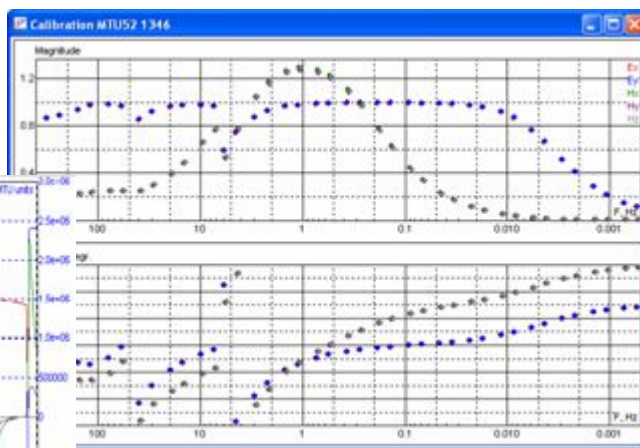
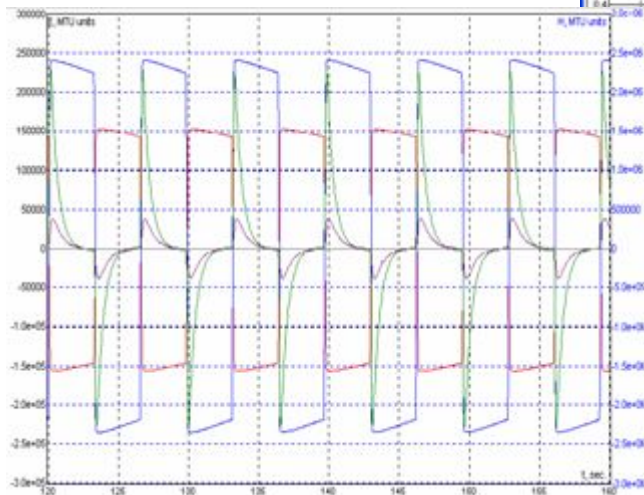
... просмотра



... обработки

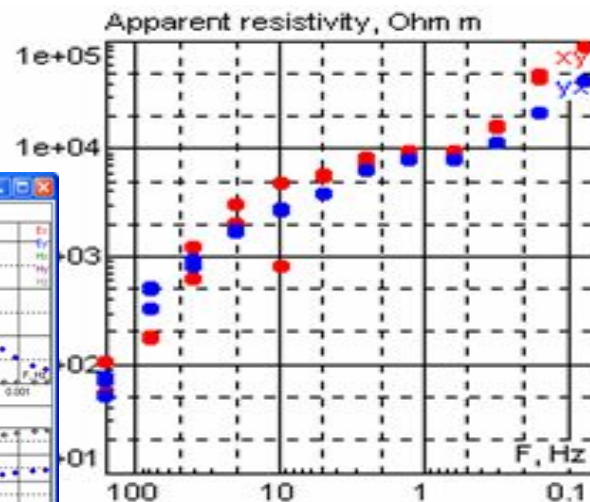
# Обработка данных MTU

Просмотр...



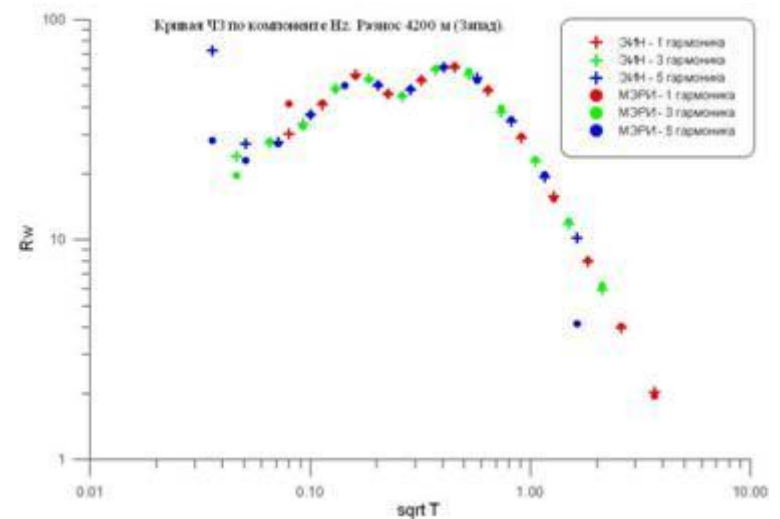
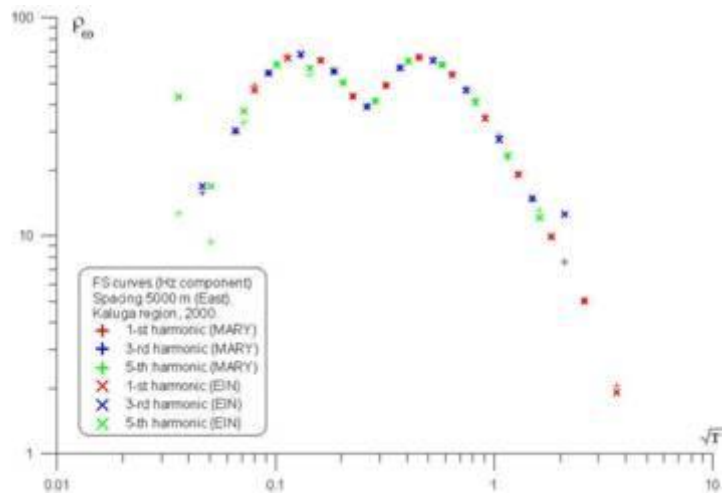
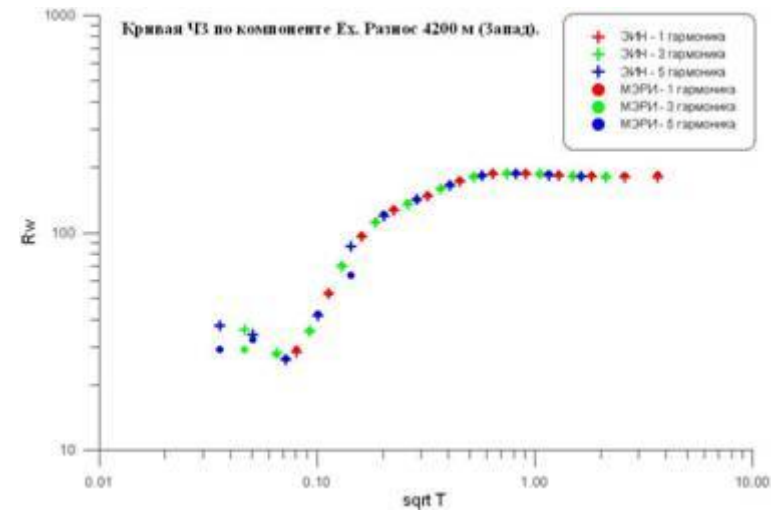
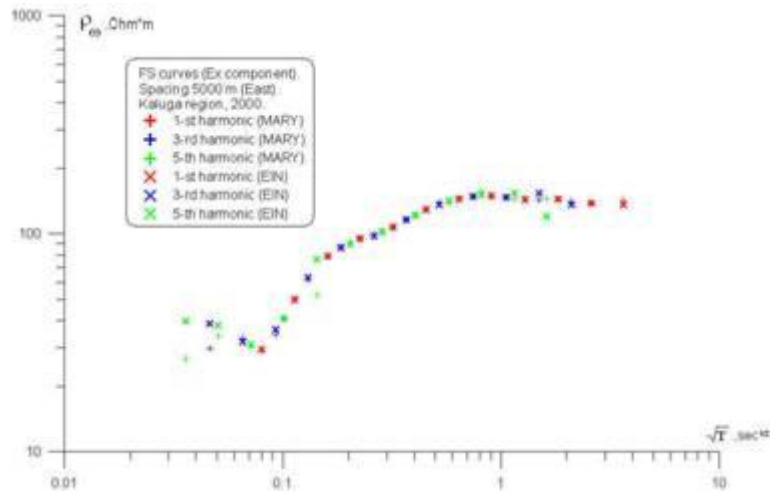
... ЧХ  
аппаратуры

... временных  
рядов



... результатов  
обработки

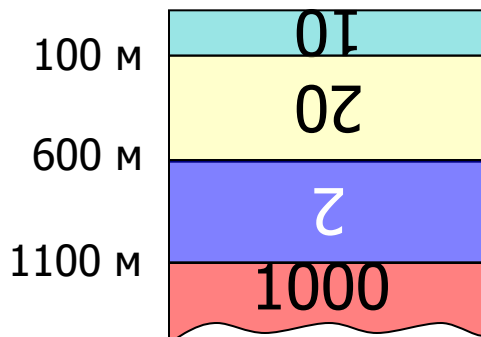
# Кривые ЧЗ (примеры)



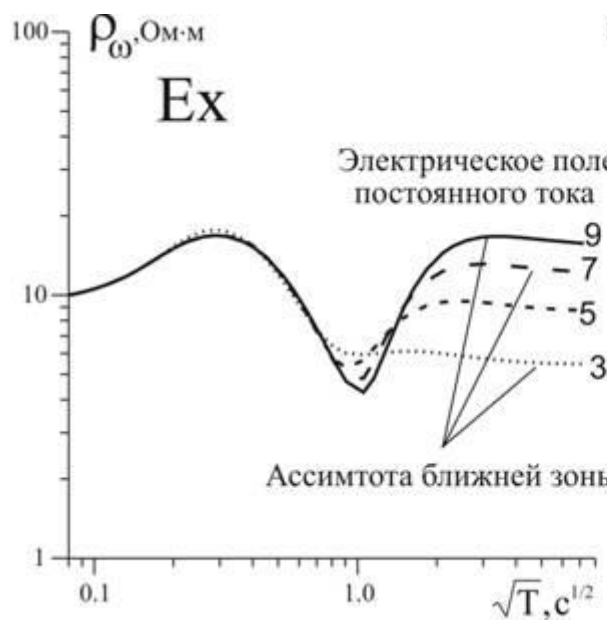


# Закономерности кривых $\rho_k$

Кривые  $\rho_k$ , построенные по компонентам  $E_x$  и  $H_z$ . Шифр кривых – разнос (км)

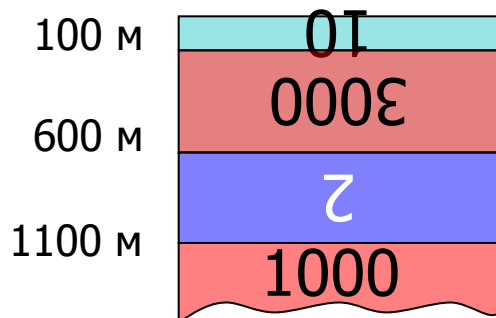


$\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $h_1 = 100 \text{ м}$   
 $\rho_2 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $h_2 = 500 \text{ м}$   
 $\rho_3 = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$   $h_3 = 500 \text{ м}$   
 $\rho_4 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$

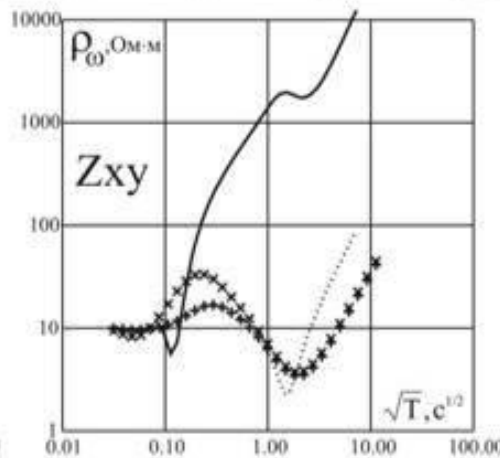
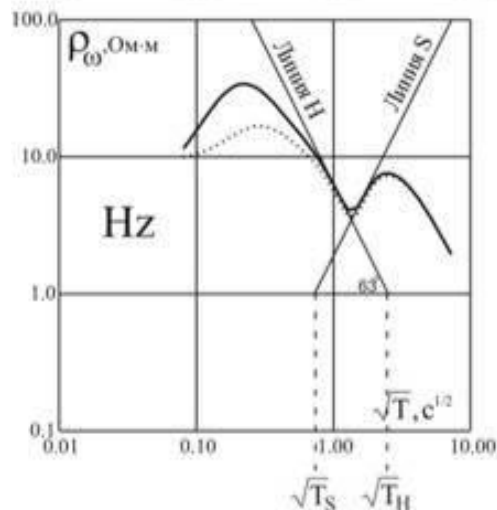
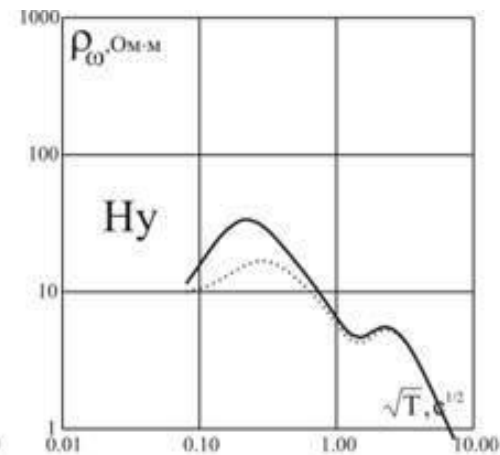
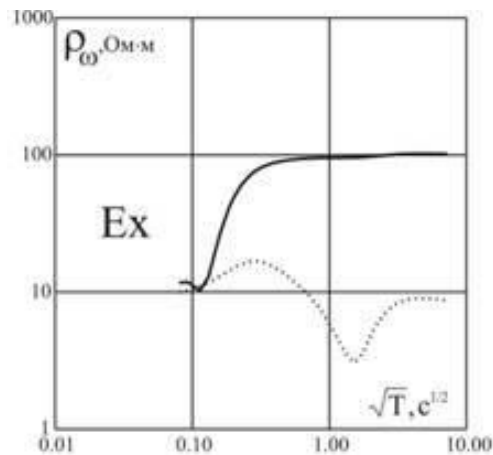
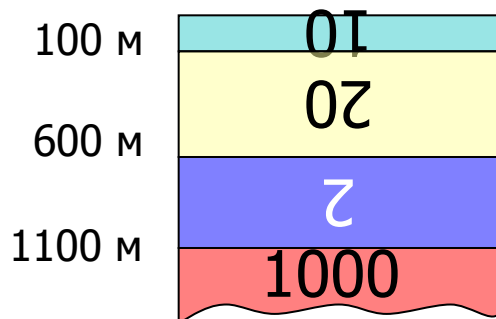


# Закономерности кривых $\rho_k$

Модель А



Модель В

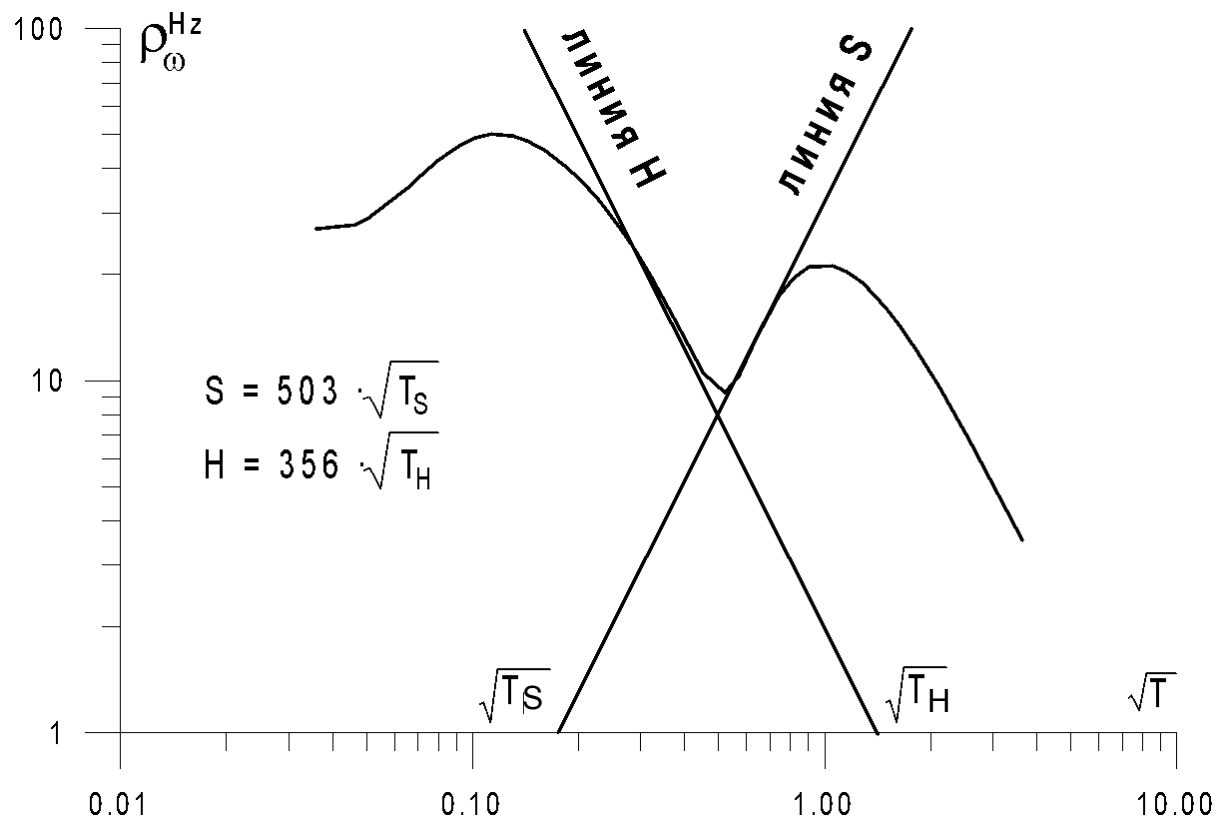


— кривые ЧЗ для модели А  
..... кривые ЧЗ для модели В

× кривая МТЗ для модели А  
+ кривая МТЗ для модели В

# Определение обобщенных параметров S и H

- S – суммарная продольная проводимость до кровли высокоомного слоя
- H - глубина до проводящего слоя

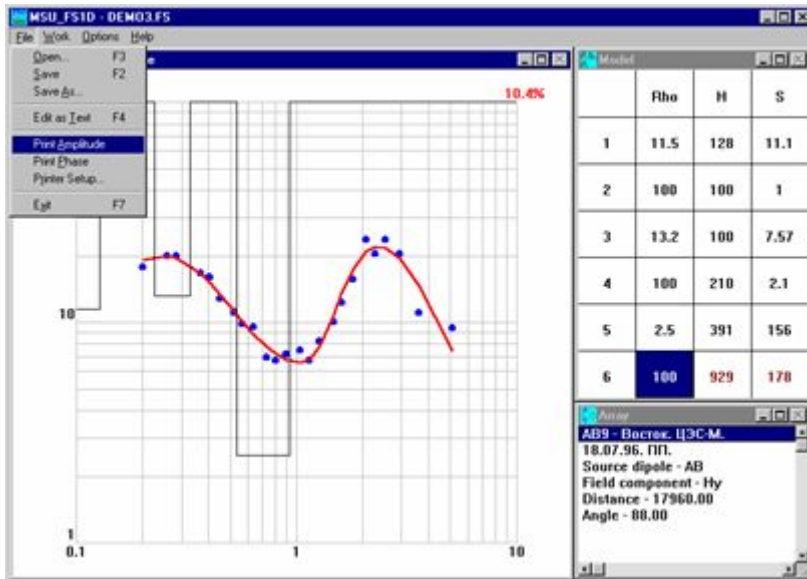


# Интерпретация данных ЧЗ

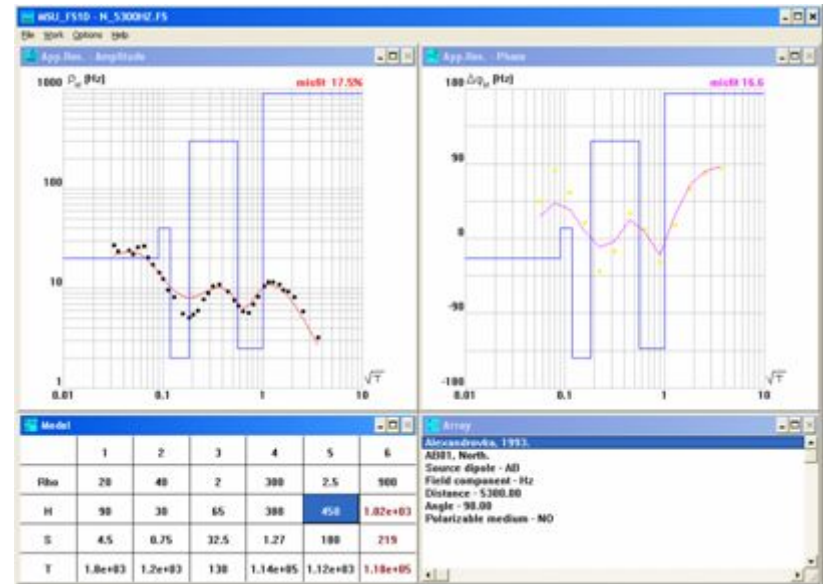
- Строится такая модель среды, которая:
  - Обеспечивает совпадение модельной и наблюдаемой кривых в пределах точности наблюдения
  - Согласуется с априорной геолого-геофизической информацией
- Программа EM1D позволяет:
  - Рассчитывать кривые ЧЗ (источник – АВ или Q, компонента –  $E_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $E_x/H_y$  или  $H_z/H_y$ ) для горизонтально-слоистой модели среды
  - Подбирать наблюдаемые амплитудные и фазовые кривые
  - Учитывать поляризуемость среды и длину линии АВ

# Интерпретация данных ЧЗ

Работа с программой MSU\_EM1D...



... подбор кривой  $\rho_k$ , построенной по компоненте  $H_y$  поля АВ

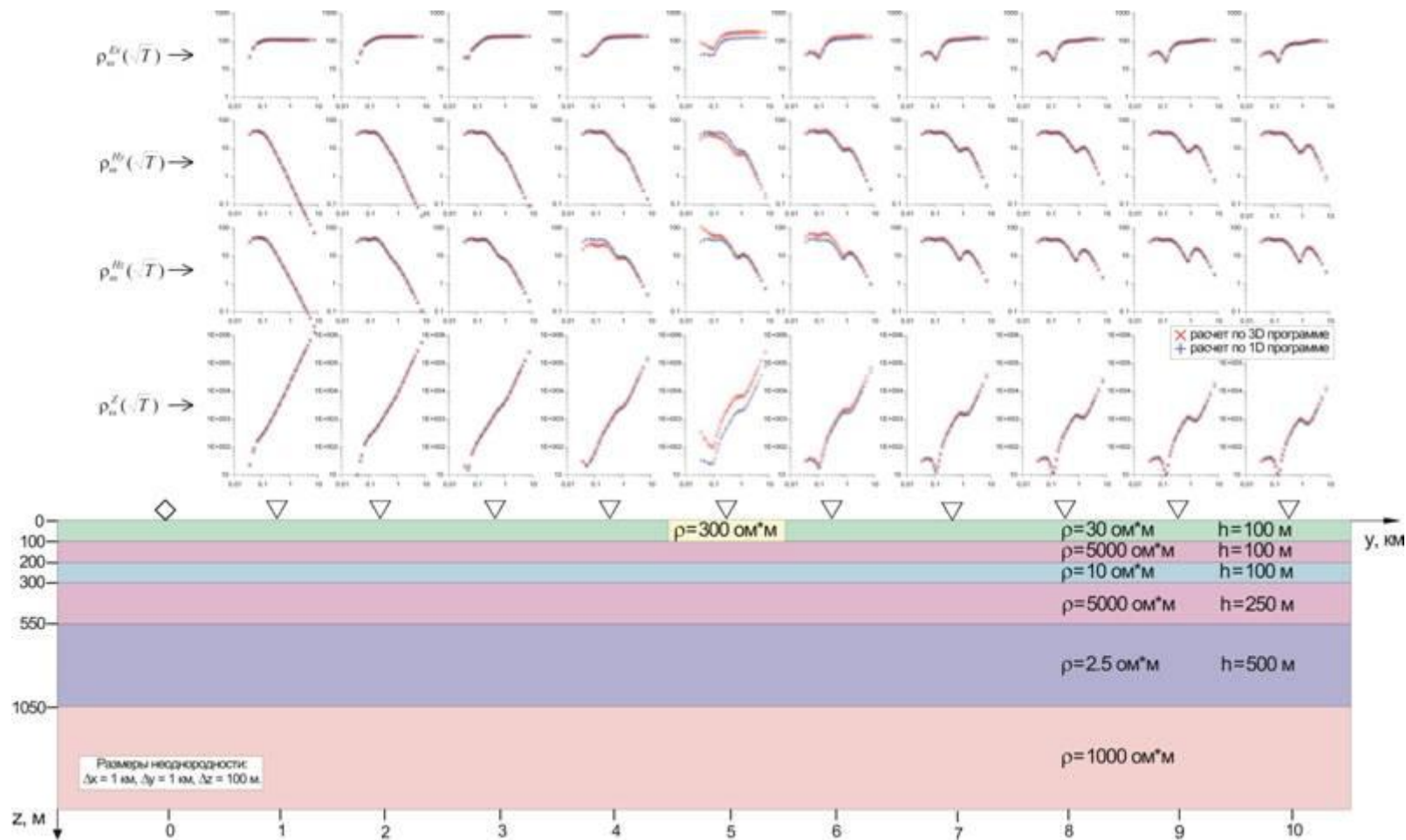


... подбор кривых  $\rho_k$  и  $\Delta\phi$ , построенных по компоненте  $H_z$  поля АВ

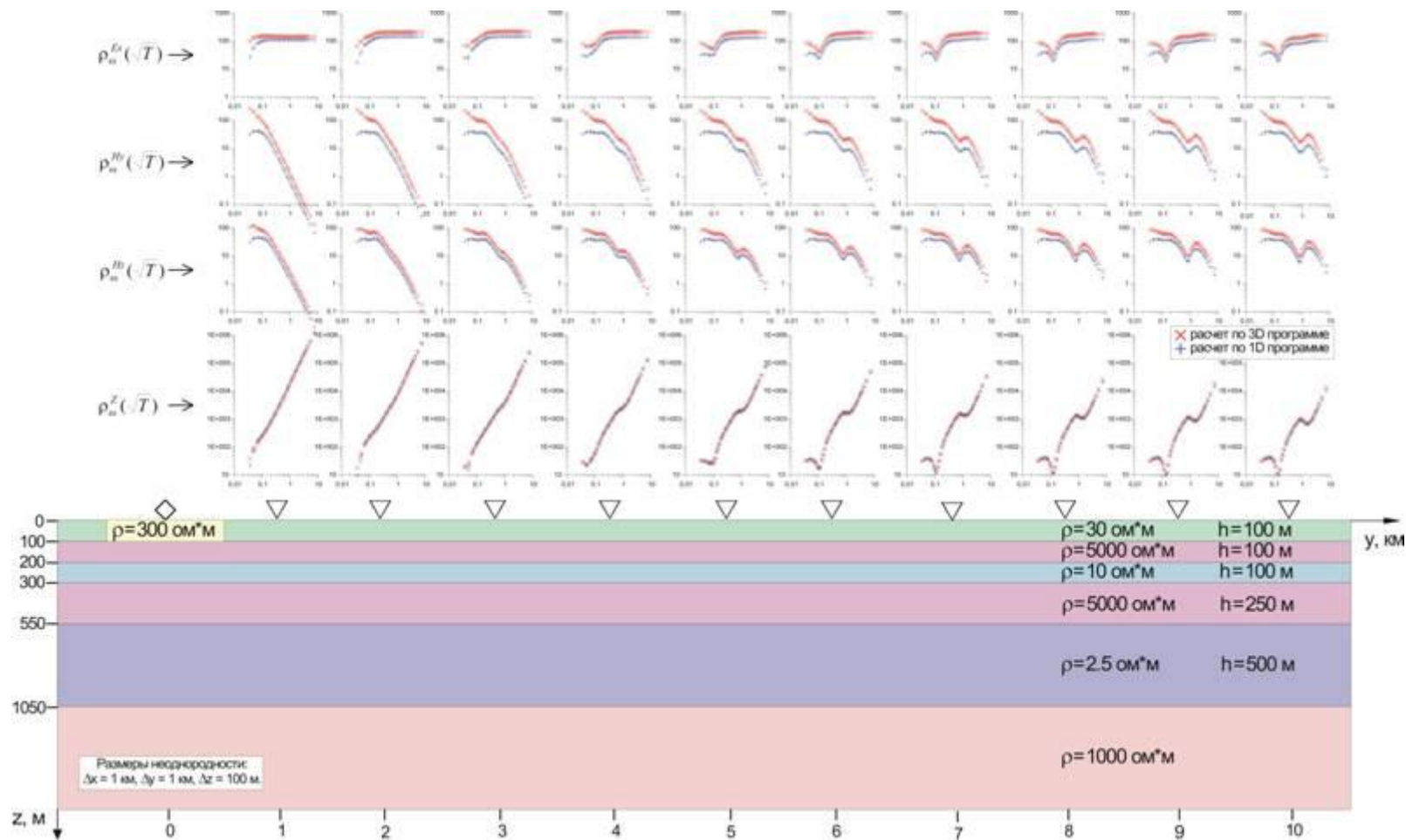
# Интерпретация данных ЧЗ

- Информация об анизотропии
  - Магнитные компоненты поля наиболее чувствительны к продольному сопротивлению слоев
  - Компонента  $E_x$  поля АВ чувствительна как к продольному, так и к поперечному сопротивлению
- Проблема с «точкой записи»
  - Разносы велики, и если разрез горизонтально неоднороден, то неясно, к какой точке относить результаты измерений
  - Ситуация улучшается при переходе от отдельных компонент к импедансу – влияние неоднородностей вблизи источника становится меньше

# Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах

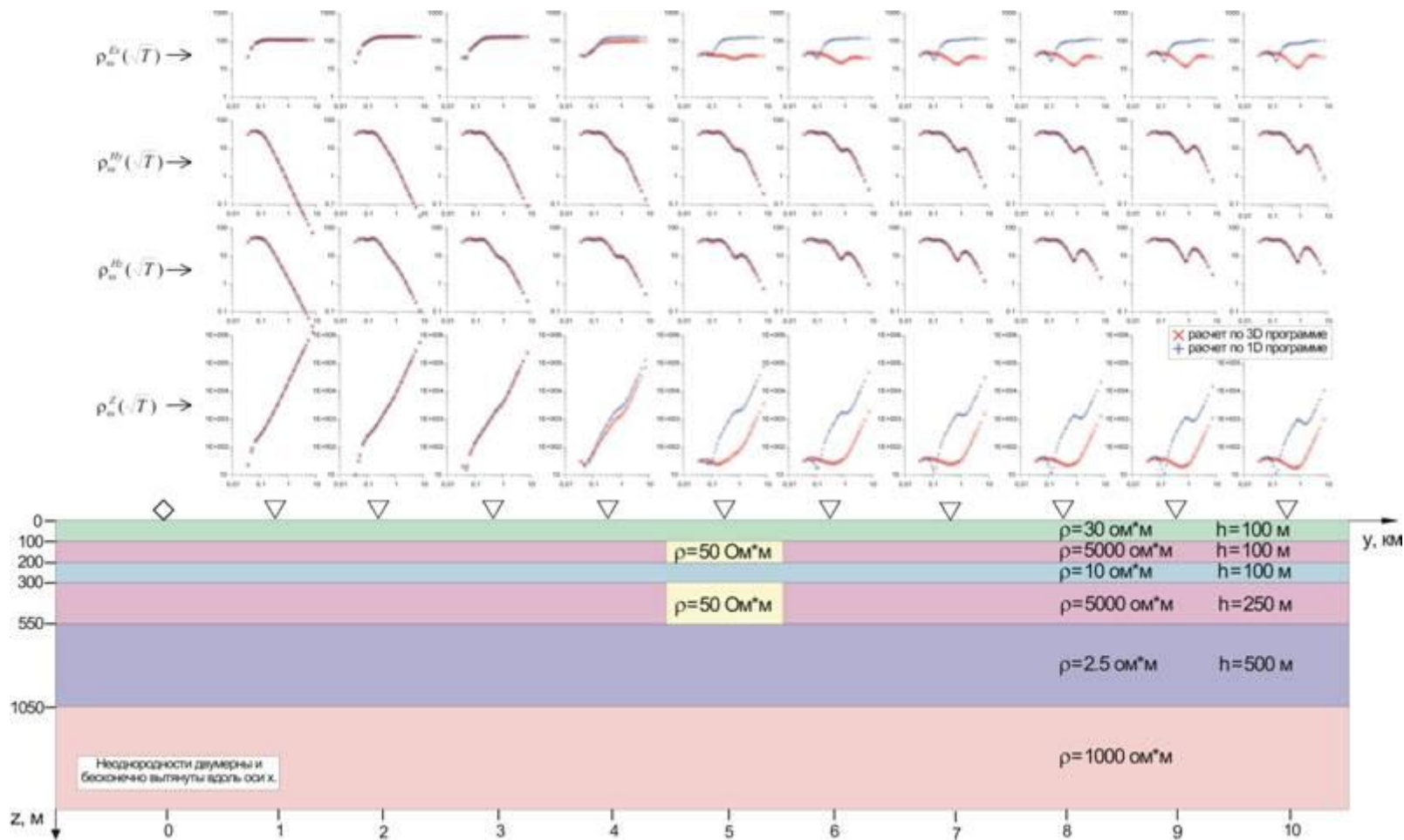


# Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах

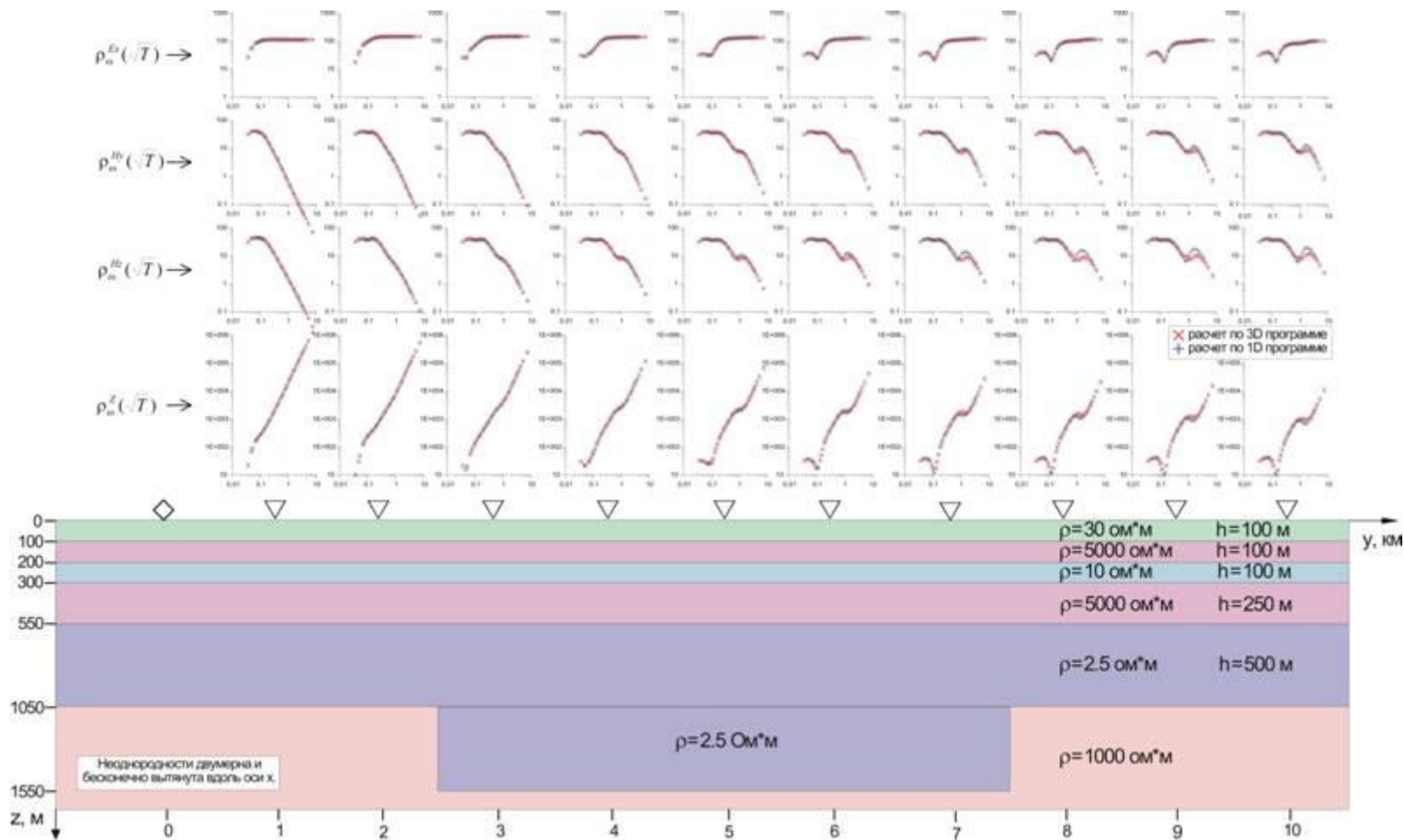




# Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



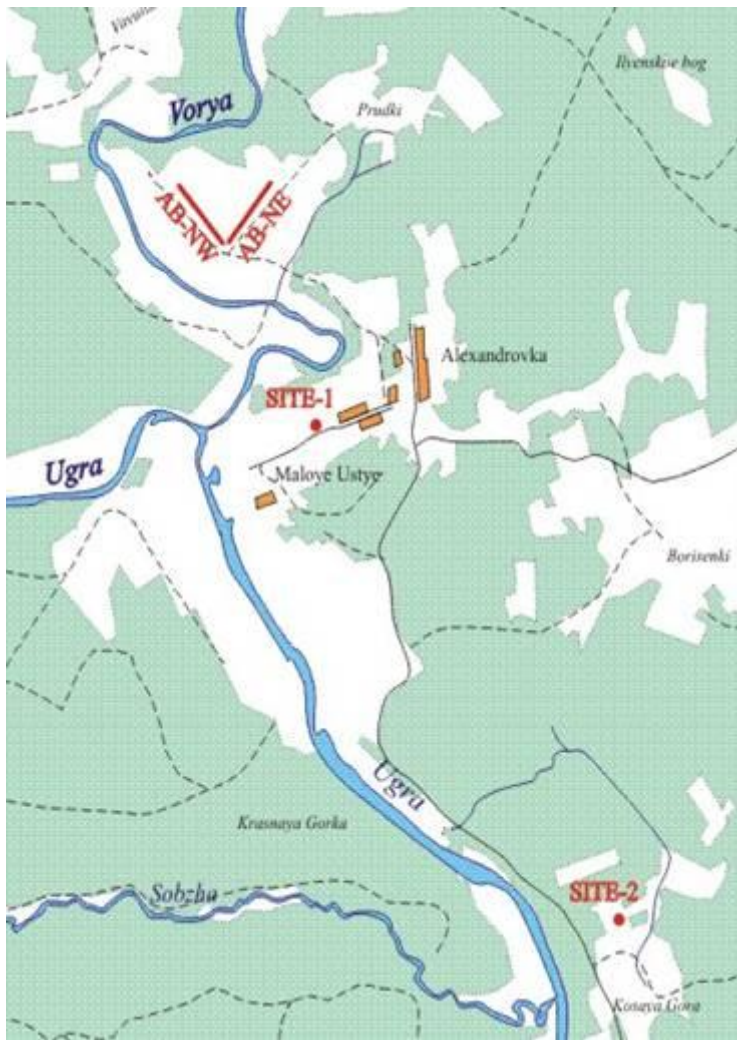
# Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



# Сравнение с МТЗ

- Недостатки ЧЗ
  - Низкая мобильность, большая стоимость работ
  - Ограничена глубинность исследований
  - Сложная структура поля
- Преимущества ЧЗ
  - За счет использования мощного искусственного источника повышается точность наблюдений
  - Использование двух компонент поля дает информацию о высокоомных слоях и об анизотропии
- Область применения ЧЗ
  - Метод ЧЗ может применяться в комплексе с МТЗ на участках с высоким уровнем помех и для получения дополнительной информации о разрезе

# ЧЗ в Александровке



# Метод ЧЗ на студенческой практике: размотка линий MN для регистрации Eх



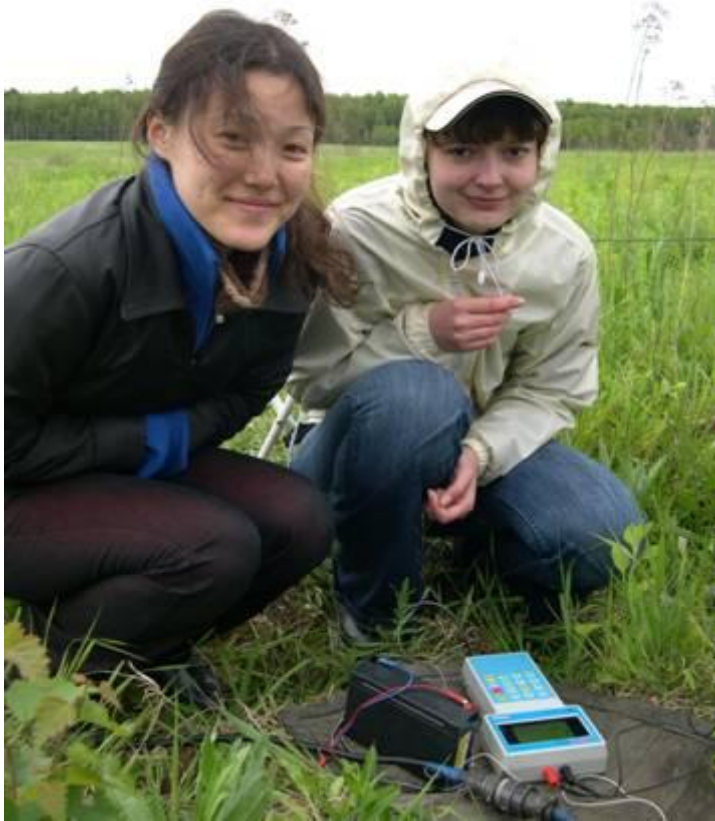
# Метод ЧЗ на студенческой практике: раскладка петли для регистрации Hz



# Метод ЧЗ на студенческой практике: установка датчиков Феникс



# Метод ЧЗ на студенческой практике: измерения с аппаратурой МЭРИ





# Метод ЧЗ на студенческой практике: измерения с аппаратурой Феникс

