Метод частотного зондирования с искусственным источником (ЧЗ)

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

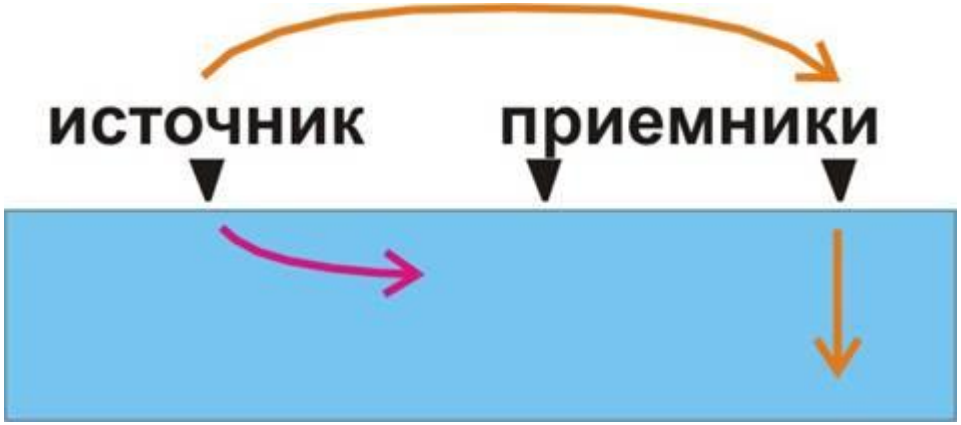
Основы метода ЧЗ

- Источники поля:
  - Заземленная линия AB (горизонтальный электрический диполь)
  - Незаземленная петля Q (вертикальный магнитный диполь)
- Изучаются частотные зависимости:
  - компонент ЭМ поля (Ex, Ey, Hx, Hy, Hz)
  - отношений (Zxy = Ex / Hy, Zyx = Ey / Hx) – 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| << 1 (малые ω, σ, r)
  - Преобладает часть поля, распространяющаяся в проводящей среде с затуханием
- Дальняя зона: |kr| >> 1 (большие ω, σ, r)
  - Преобладает часть поля, распространяющаяся в непроводящей среде без затухания

Нормальное поле ГЭД

- В дальней зоне (|kr| >> 1)

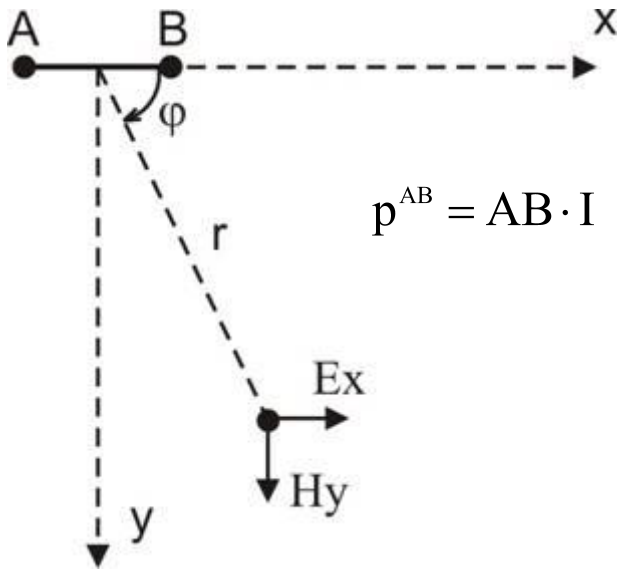
$$Ex = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2\varphi - 2}{r^3} \cdot \rho \qquad Hy = \frac{1}{\sqrt{-i\omega\mu_0}} \cdot \frac{p^{AB}}{2\pi} \frac{3\cos^2\varphi - 2}{r^3} \cdot \sqrt{\rho}$$

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

- В ближней зоне (|kr| << 1)

$$Ex = \frac{p^{AB}}{2\pi} \cdot \frac{3 \cdot \cos^2\varphi - 1}{r^3} \cdot \rho \qquad Hy = -\frac{p^{AB}}{2\pi} \frac{\sin^2\varphi - 0.5}{r^2}$$

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



Выводы по нормальным полям

- В БЗ (|kr| << 1) большинство компонент поля не зависят от ρ, и понижение частоты не приводит к увеличению глубинности
- В ДЗ (|kr| >> 1) все компоненты поля зависят от ρ,
  а Z равен импедансу среды в поле плоской волны
- В ДЗ при удалении от источника:
  - AB-Ex и AB-Hy убывают как $1/r^3$
  - AB-Hz, Q-Eϕ и Q-Hr убывают как $1/r^4$
  - Q-Hz убывает как $1/r^5$
- В ДЗ:
  - Ex (Eϕ) и Hz пропорциональны ρ
  - Hy (Hr) 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 ~ 1 км, для его изучения необходимы разносы ~ 3 км и более

Способы возбуждения поля

- Гальванический (точнее, смешанный) – линия AB
  - 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 х 100 м, 23 витка
  - Индукционные датчики (МТС-50, АМТС-30 и др.)

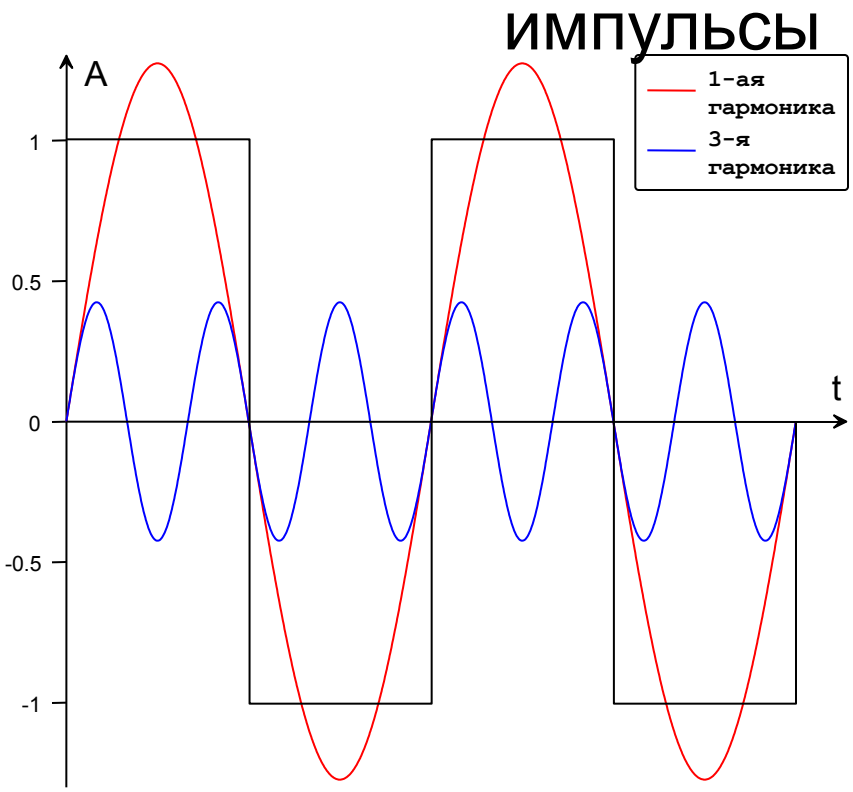
$$\Delta U_{Ex} = |MN| \cdot Ex \qquad \varepsilon_{Hz} = \omega \mu_0 nS \cdot Hz \qquad \varepsilon_{Hy} = K \cdot Hy$$

Типы установок

- При использовании AB наиболее удобны:
  - Экваториальная (Ex, Hy и Hz максимальны и слабо зависят от азимутального угла)
  - Осевая (Ex и Hy максимальны и слабо зависят от азимутального угла, но Hz = 0)
- При использовании Q:
  - Измеряют компоненты $E\phi$, Hr и Hz (поскольку поле обладает цилиндрической симметрией)

Форма сигнала

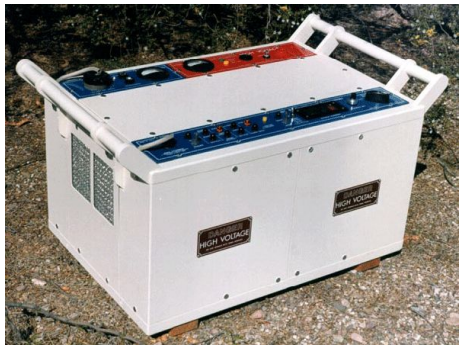
- Сигнал типа «меандр» (прямоугольные без паузы)



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

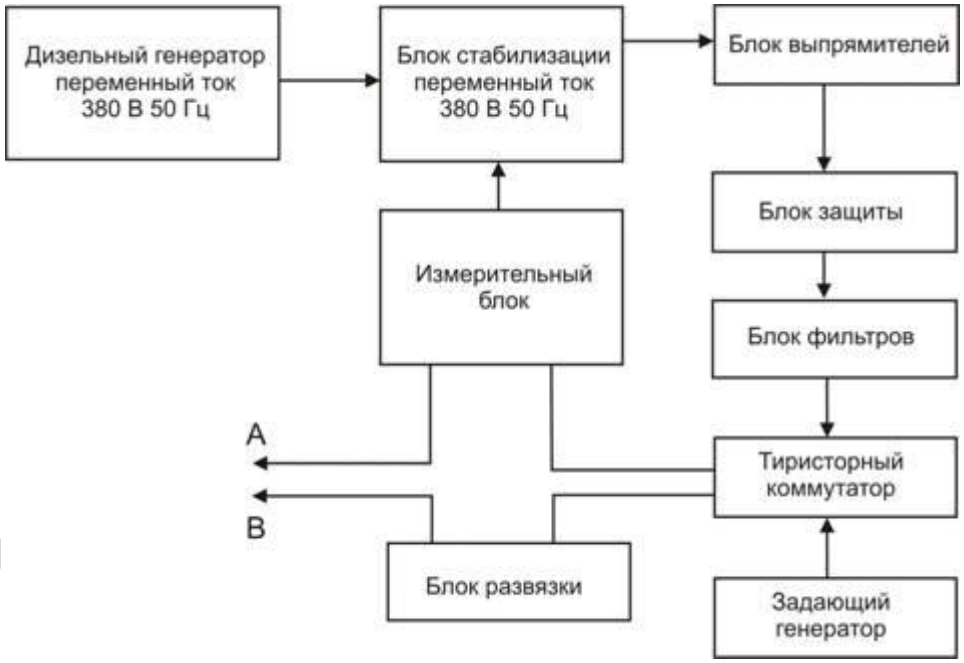
AGE-xxl

Phoenix MTU, MTU-A

Phoenix V8

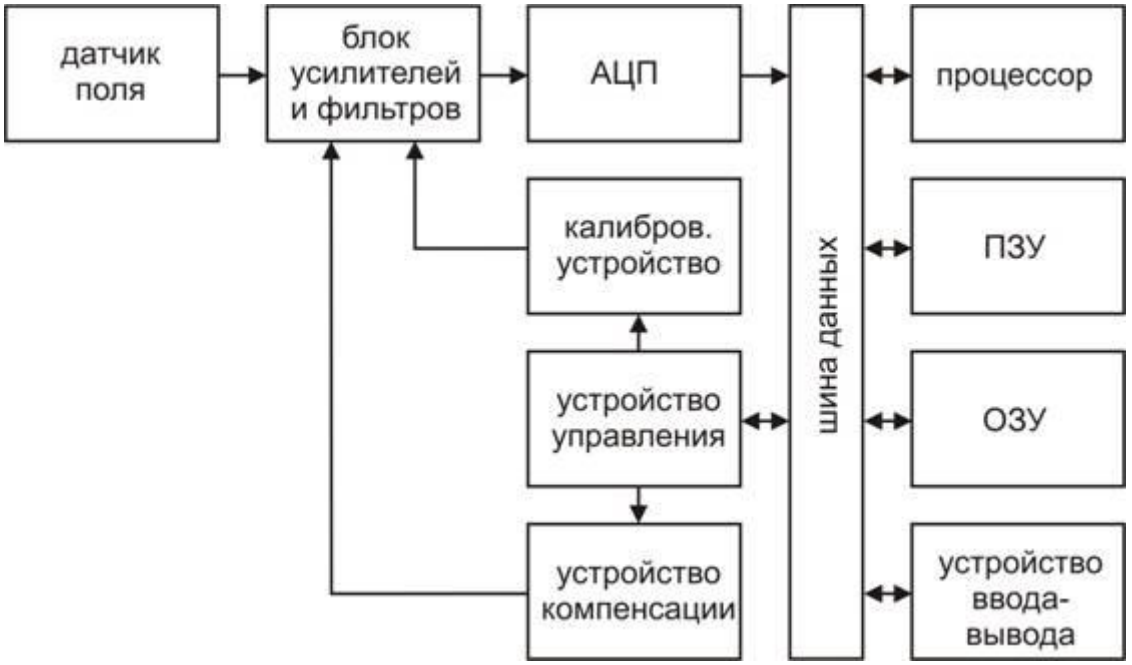
Генераторная группа УГЭ-50

- 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 МОм
  - диапазон от -3 до +3 В
  - минимальный сигнал 1 мкВ



Сравнение MTU и МЭРИ-24

- Преимущества MTU:
  - 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 MTU
  - 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

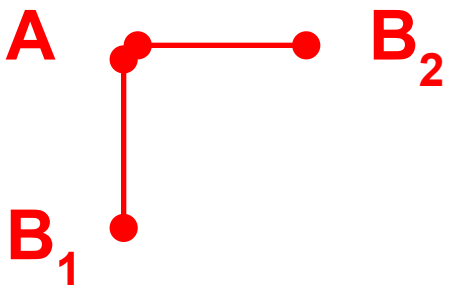
Об определении Zij

- Скалярные импедансы

$$Z^{S}_{xy} = \mathrm{Ex/Hy} \quad Z^{S}_{yx} = -\mathrm{Ey/Hx}$$

- Компоненты тензора импеданса

$$\begin{cases} Ex^{(1)} = ZxxHx^{(1)} + ZxyHy^{(1)} \\ Ey^{(1)} = ZyxHy^{(1)} + ZyyHy^{(1)} \\ Ex^{(2)} = ZxxHx^{(2)} + ZxyHy^{(2)} \\ Ey^{(2)} = ZyxHy^{(2)} + ZyyHy^{(2)} \end{cases}$$



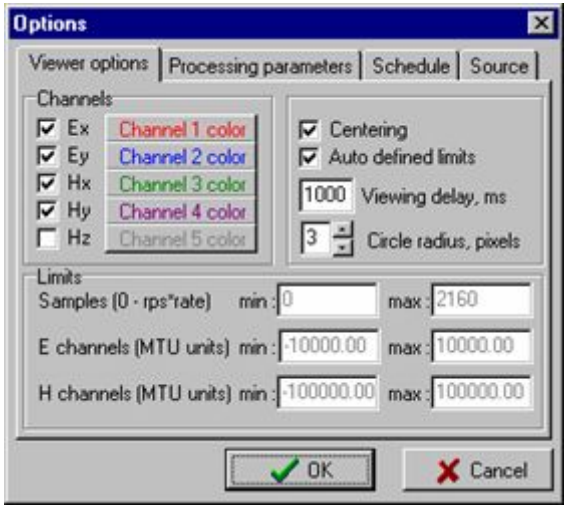
Обработка данных MTU

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

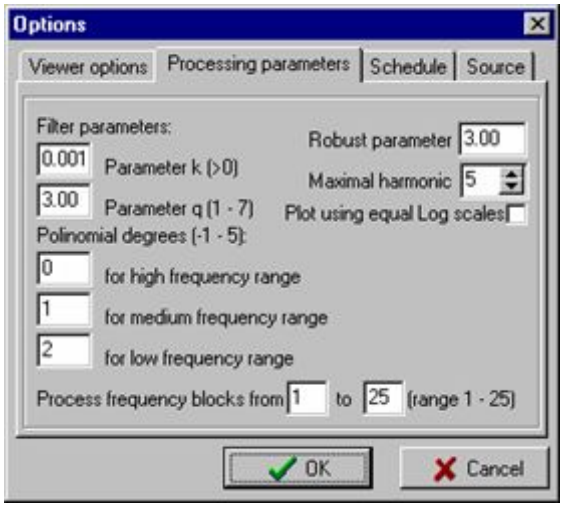
Обработка данных MTU

Выбор параметров…

… регистрации



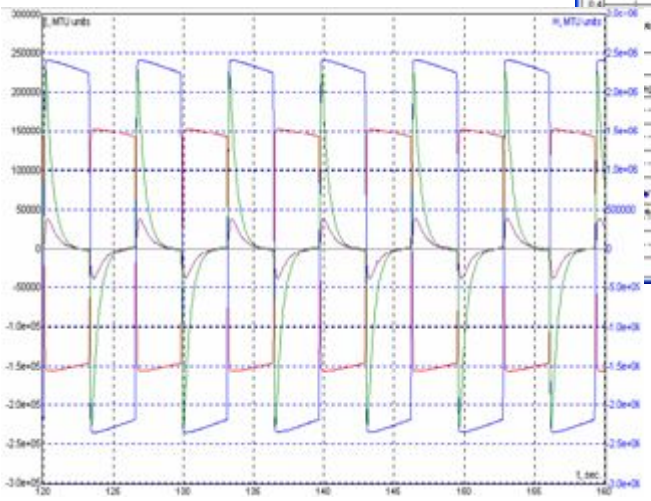
… просмотра



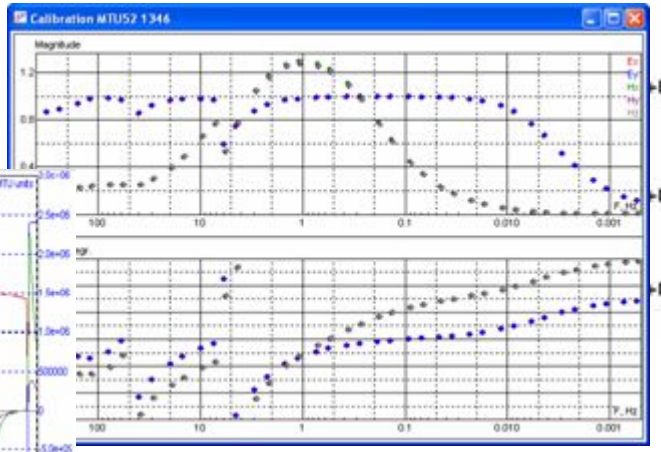
… обработки

Обработка данных MTU

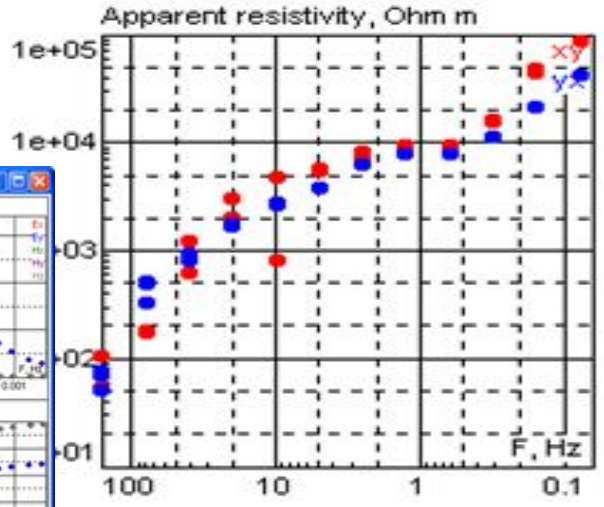
Просмотр…



… временных рядов

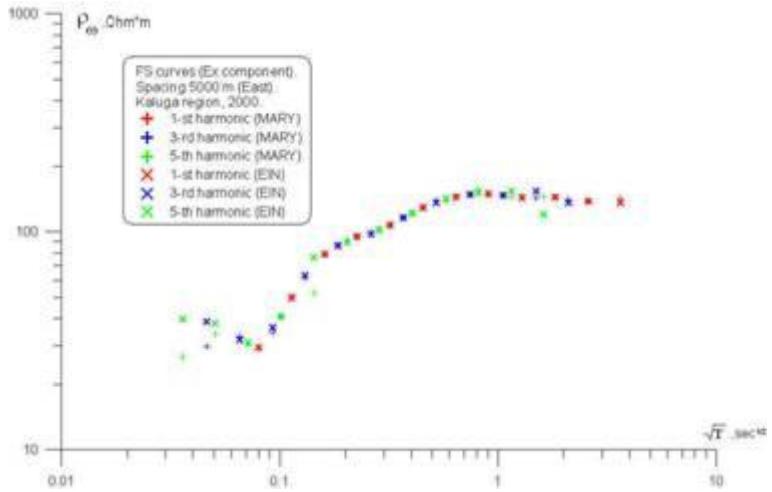


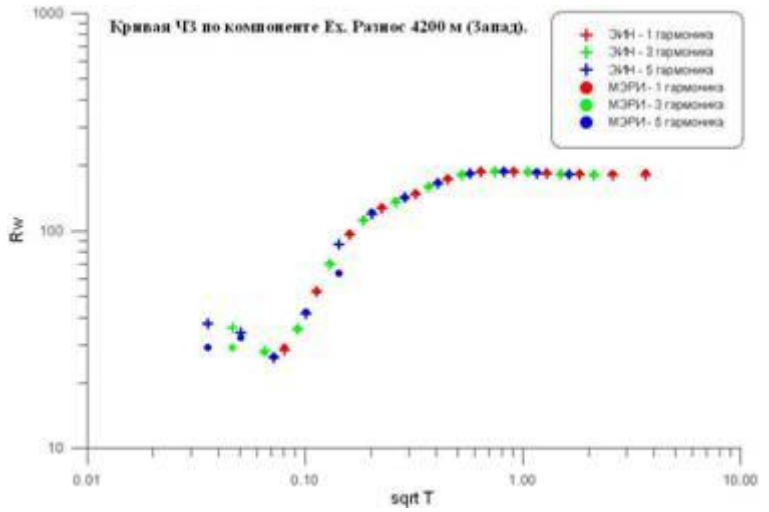
… ЧХ аппаратуры

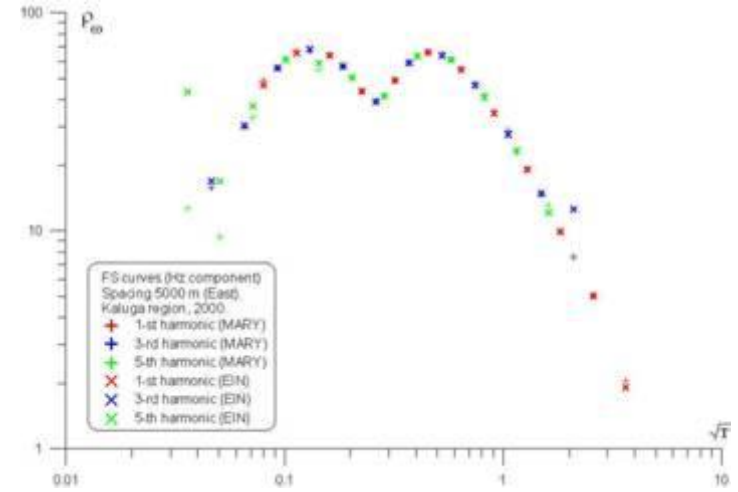


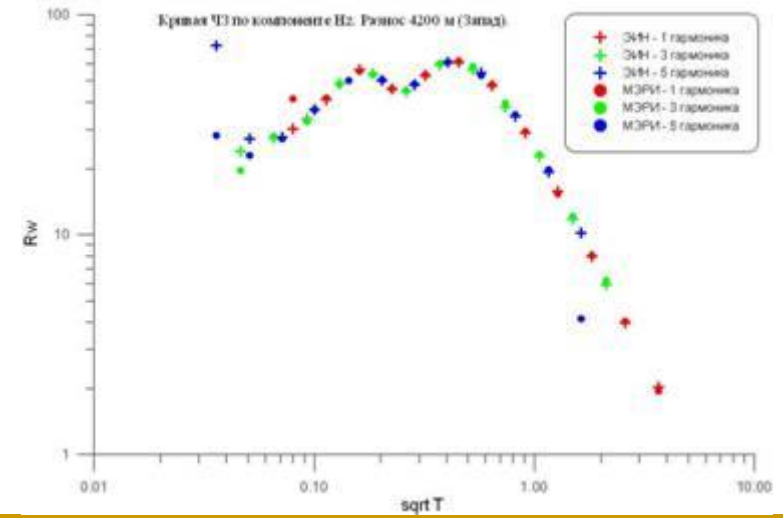
… результатов обработки

Кривые ЧЗ (примеры)



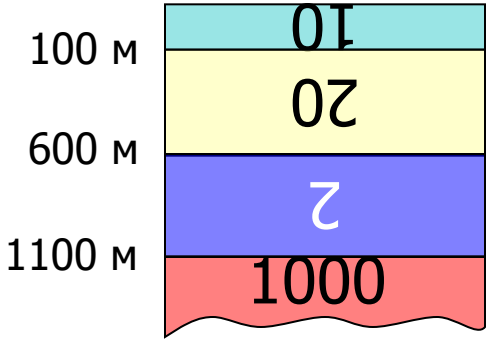






Закономерности кривых ρ_k

Кривые ρ_k, постро-
енные по компонен-
там Ex и Hz. Шифр
кривых – разнос (км)

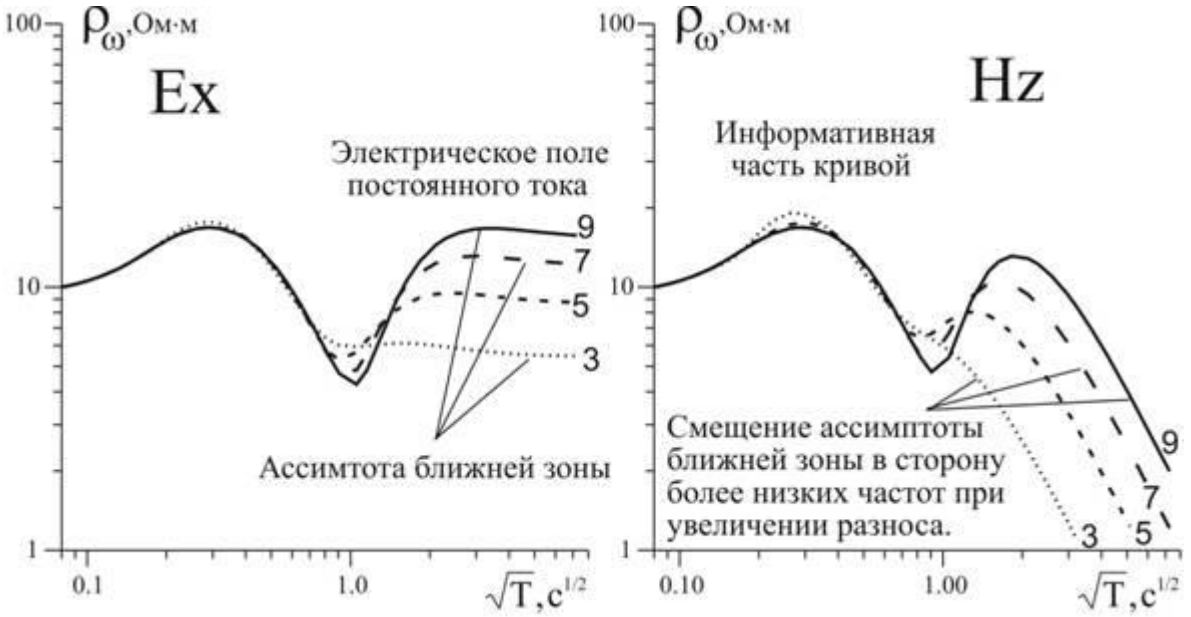


$\rho_1 = 10$ Ом·м $h_1 = 100$ м

$\rho_2 = 20$ Ом·м $h_2 = 500$ м

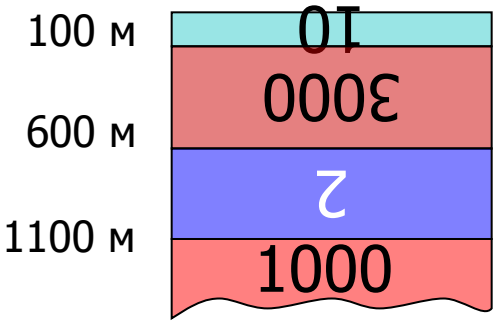
$\rho_3 = 2$ Ом·м $h_3 = 500$ м

$\rho_4 = 1000$ Ом·м

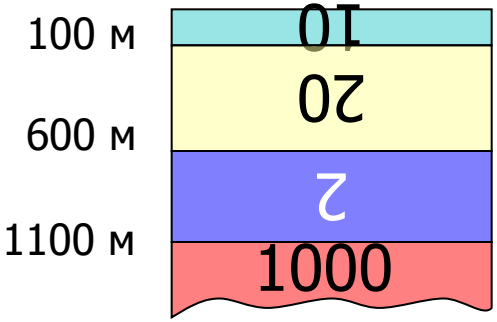


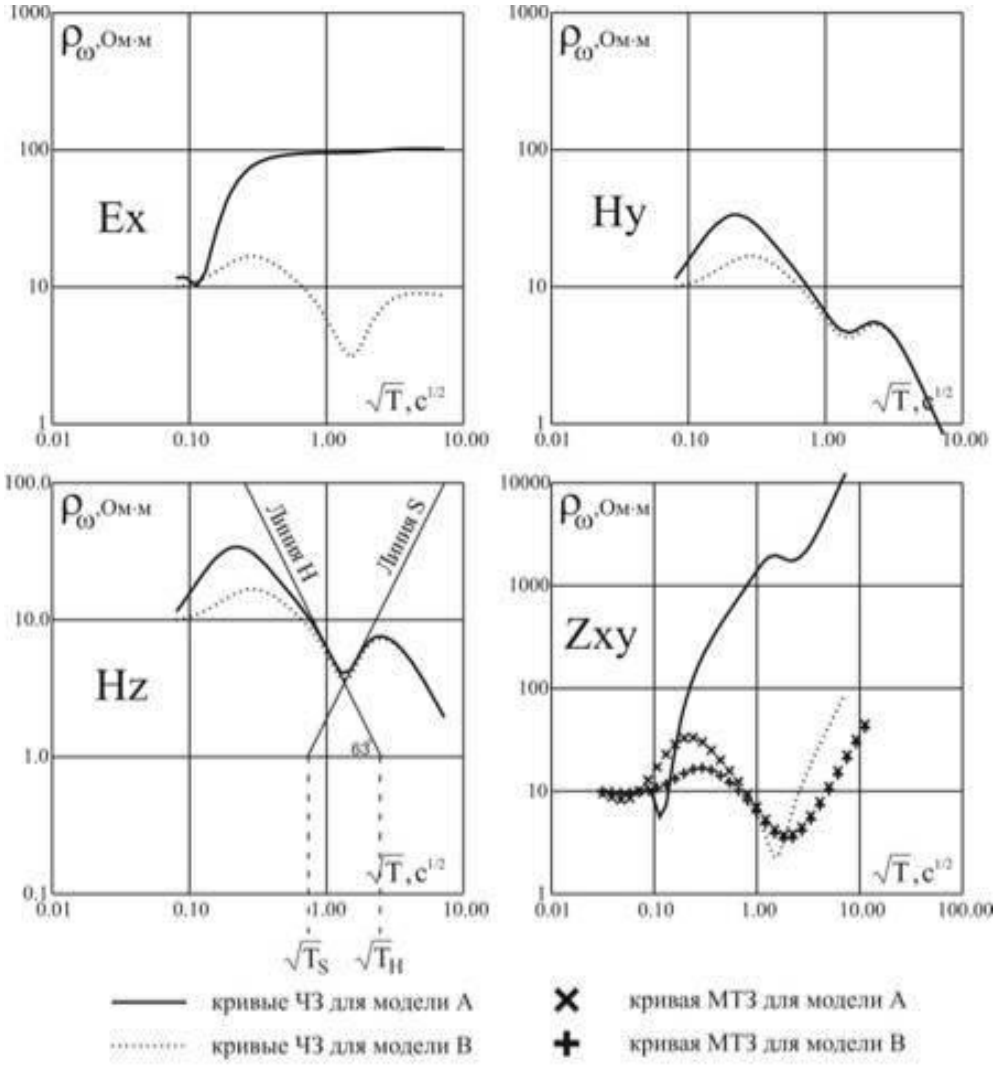
Закономерности кривых ρ_k

Модель А



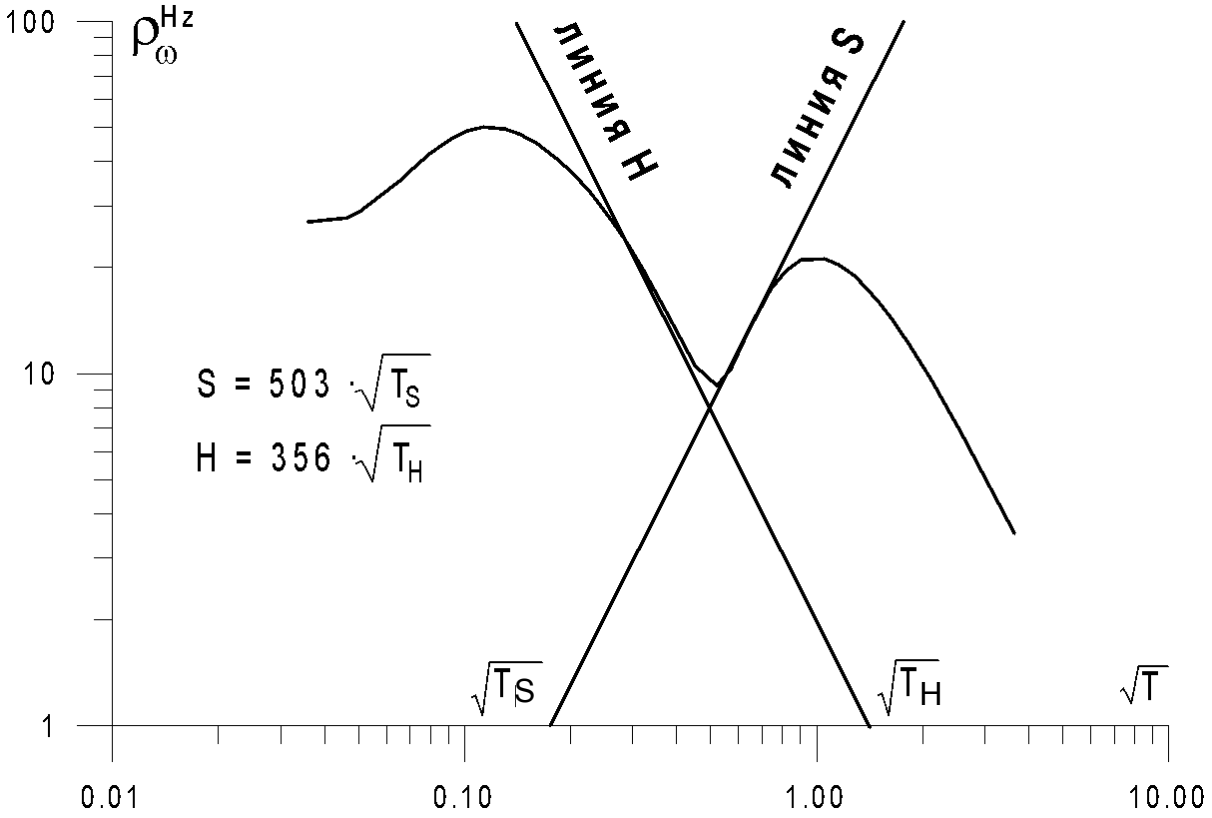
Модель В





Определение обобщенных параметров S и H

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

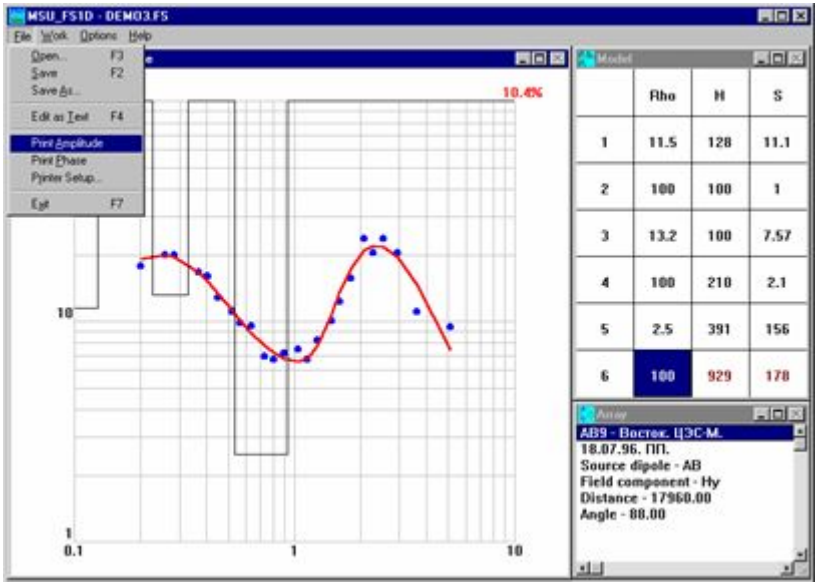


Интерпретация данных ЧЗ

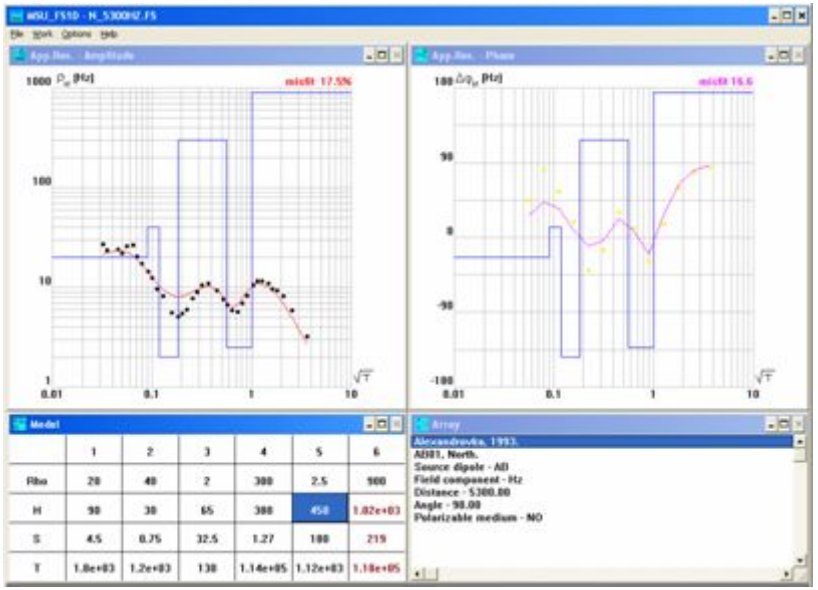
- Строится такая модель среды, которая:
  - Обеспечивает совпадение модельной и наблюденной кривых в пределах точности наблюдения
  - Согласуется с априорной геолого-геофизической информацией
- Программа EM1D позволяет:
  - Рассчитывать кривые ЧЗ (источник – AB или Q, компонента – Ex, Hy, Hz, Ex/Hy или Hz/Hy) для горизонтально-слоистой модели среды
  - Подбирать наблюденные амплитудные и фазовые кривые
  - Учитывать поляризуемость среды и длину линии AB

Интерпретация данных ЧЗ

Работа с програм-мой MSU_EM1D…



… подбор кривой ρ_k, построен-ной по компоненте Ну поля АВ

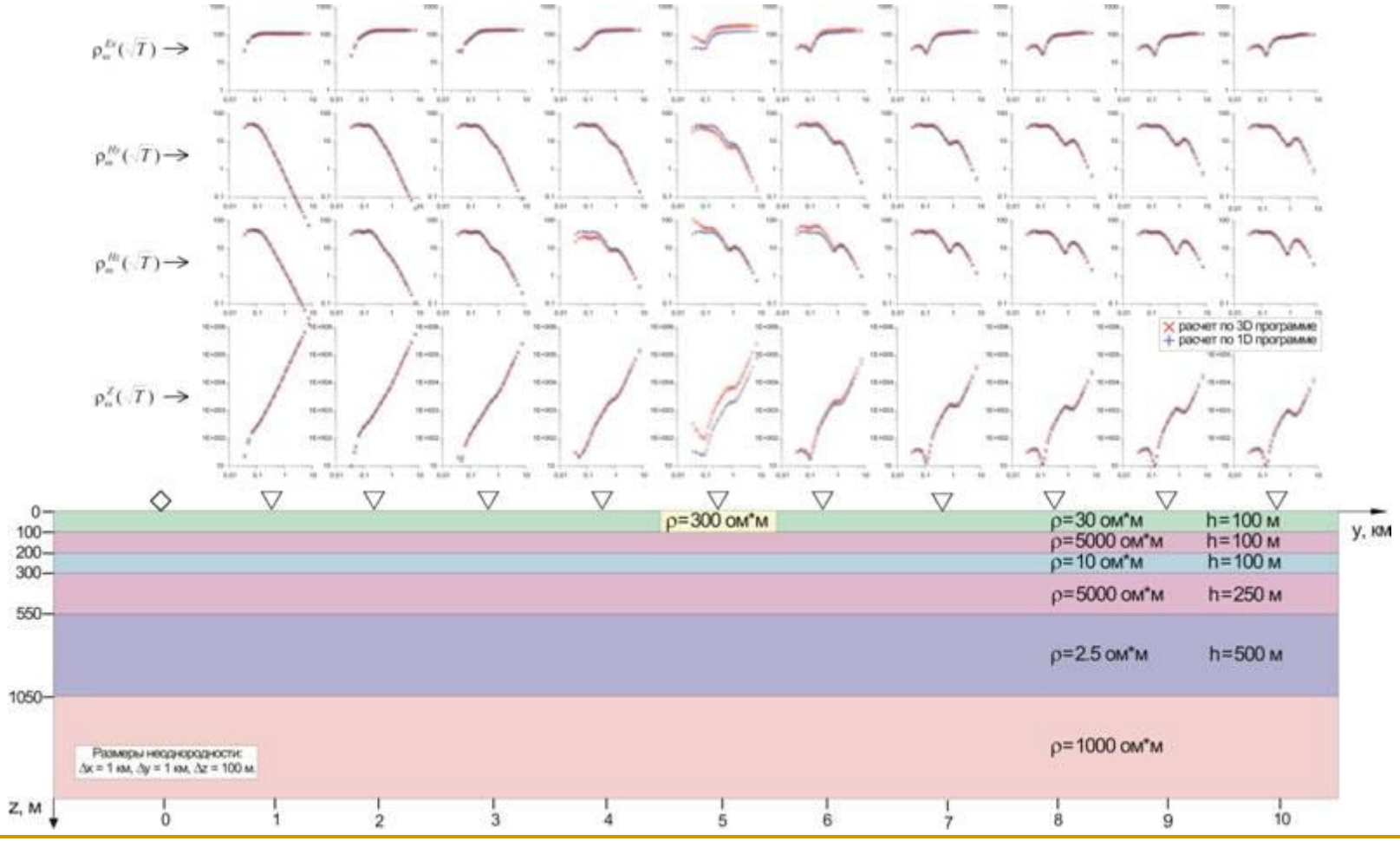


… подбор кривых ρ_k и $\Delta\phi$, построенных по компоненте Hz поля АВ

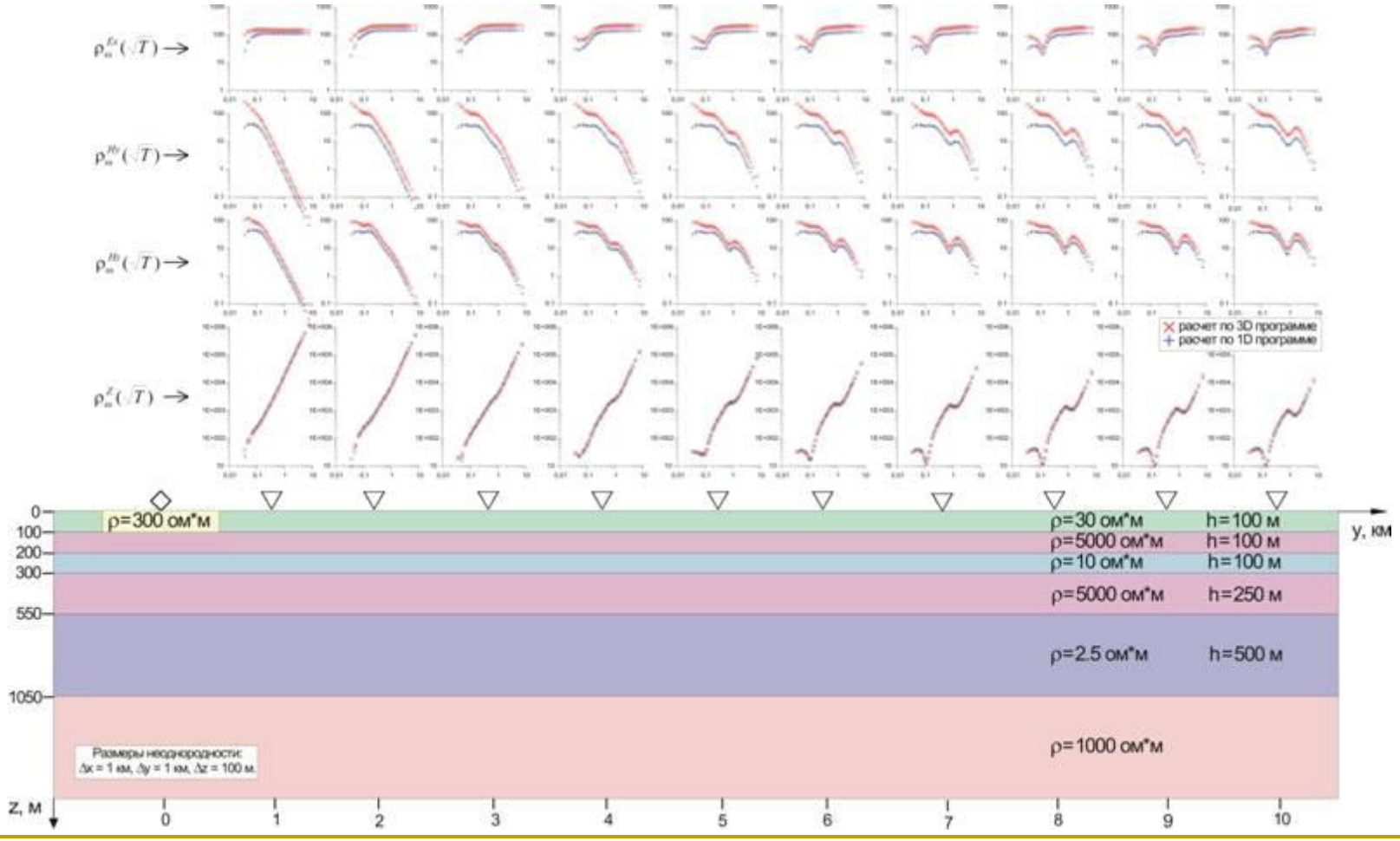
Интерпретация данных ЧЗ

- Информация об анизотропии
  - Магнитные компоненты поля наиболее чувствительны к продольному сопротивлению слоев
  - Компонента Ex поля AB 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

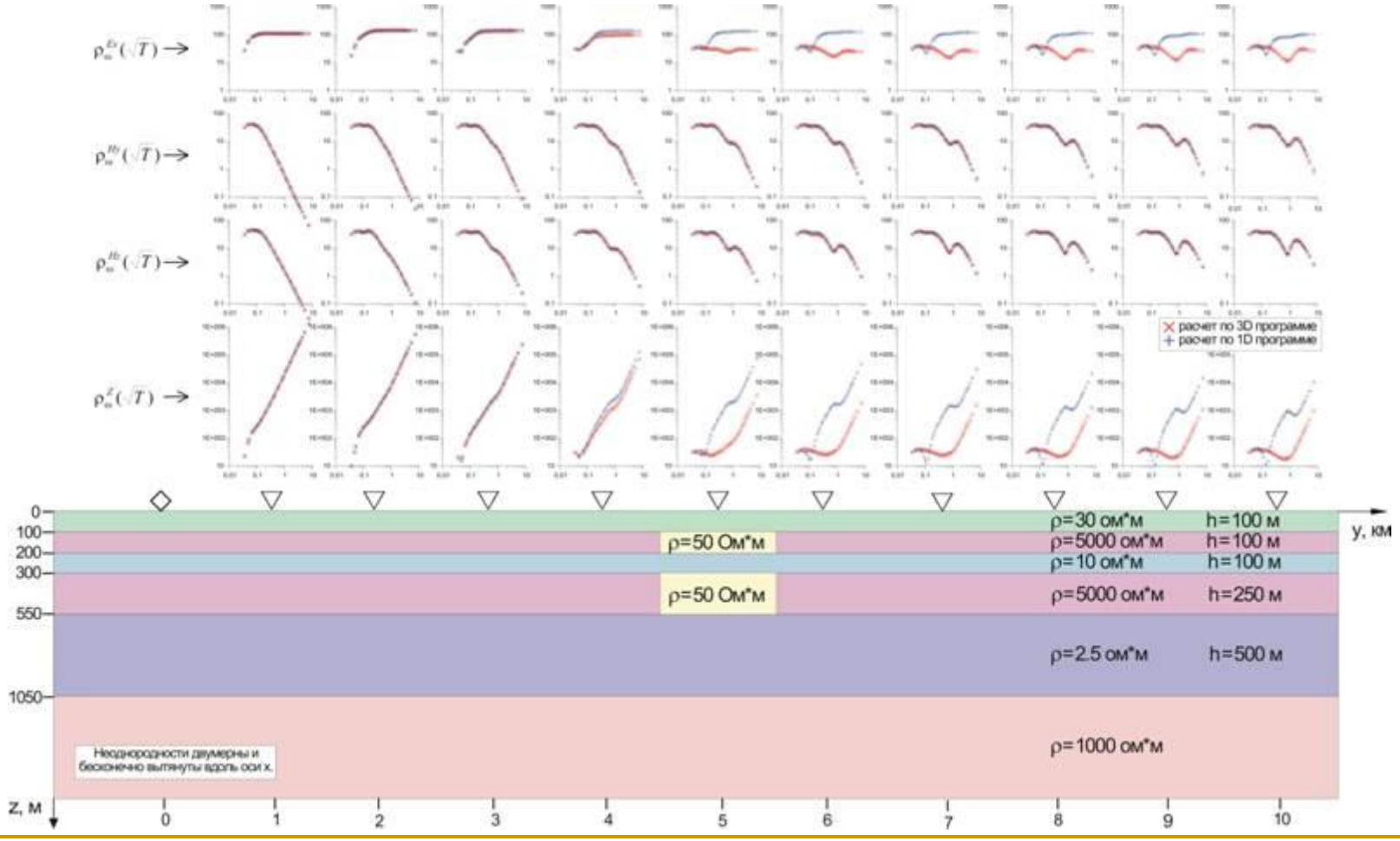
Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



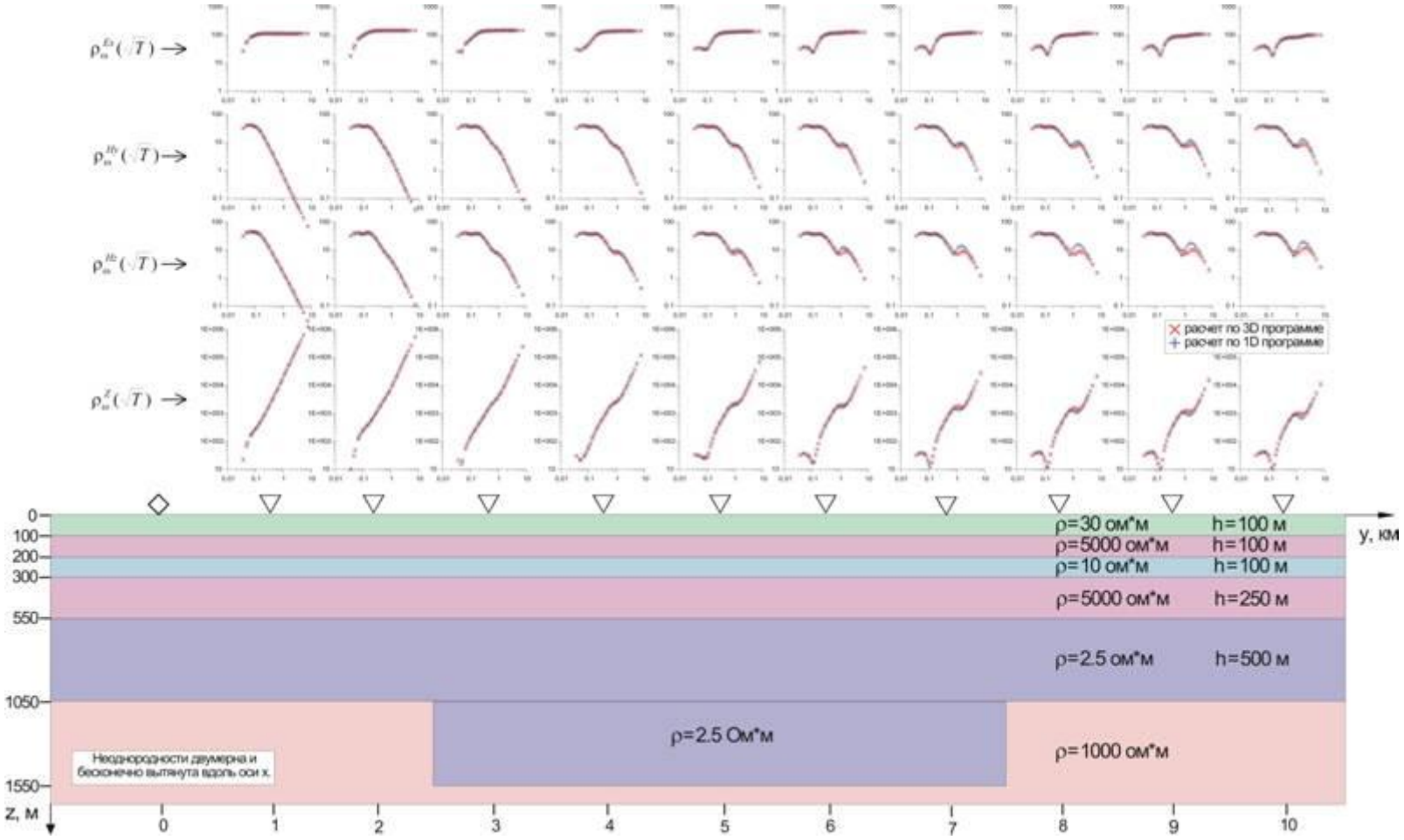
Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



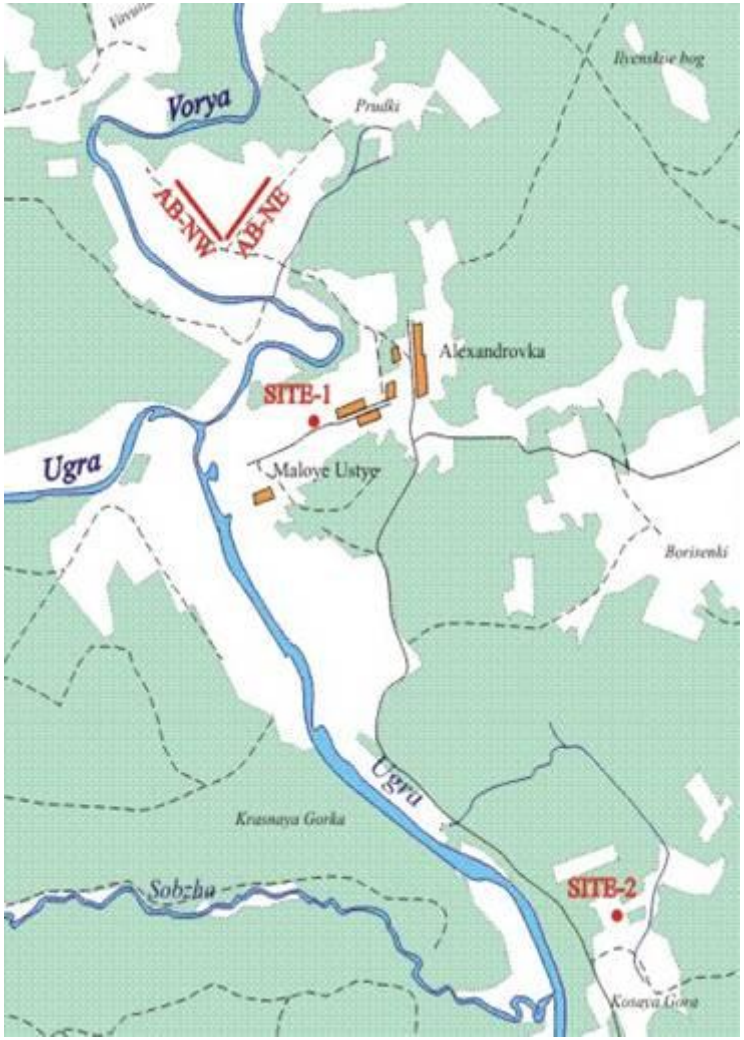
Искажения кривых ЧЗ в горизонтально-неоднородных средах



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

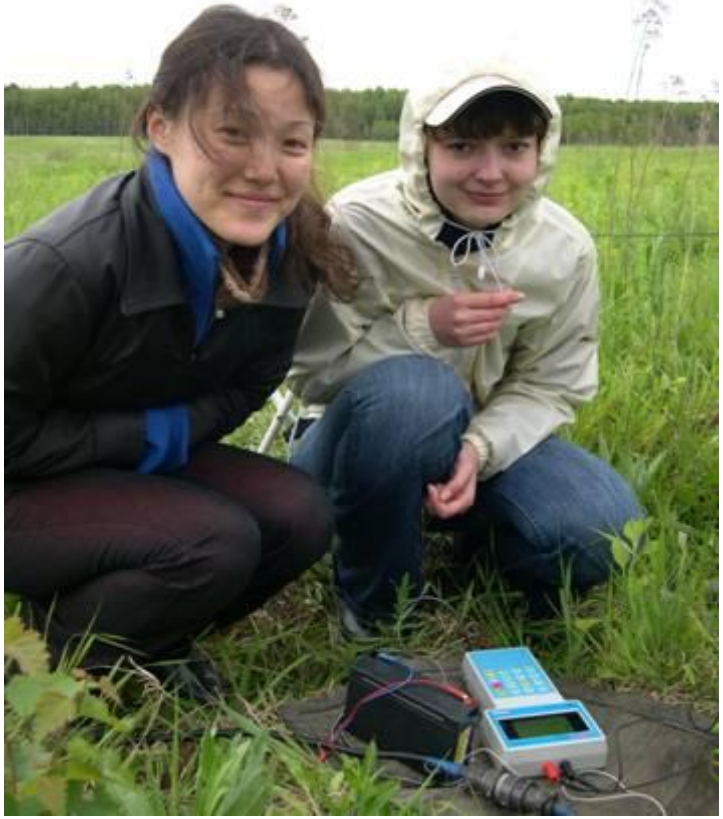


Метод ЧЗ на студенческой практике: размотка линий MN для регистрации Ex

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