

**Электромагнитные
зондирования (ВЭЗ, ДЭЗ,
ВЭЗ-ВП, ЧЗ, ЗС, МТЗ)**

**Шевнин Владимир Алексеевич
shevninvlad@yandex.ru**

Зондирования

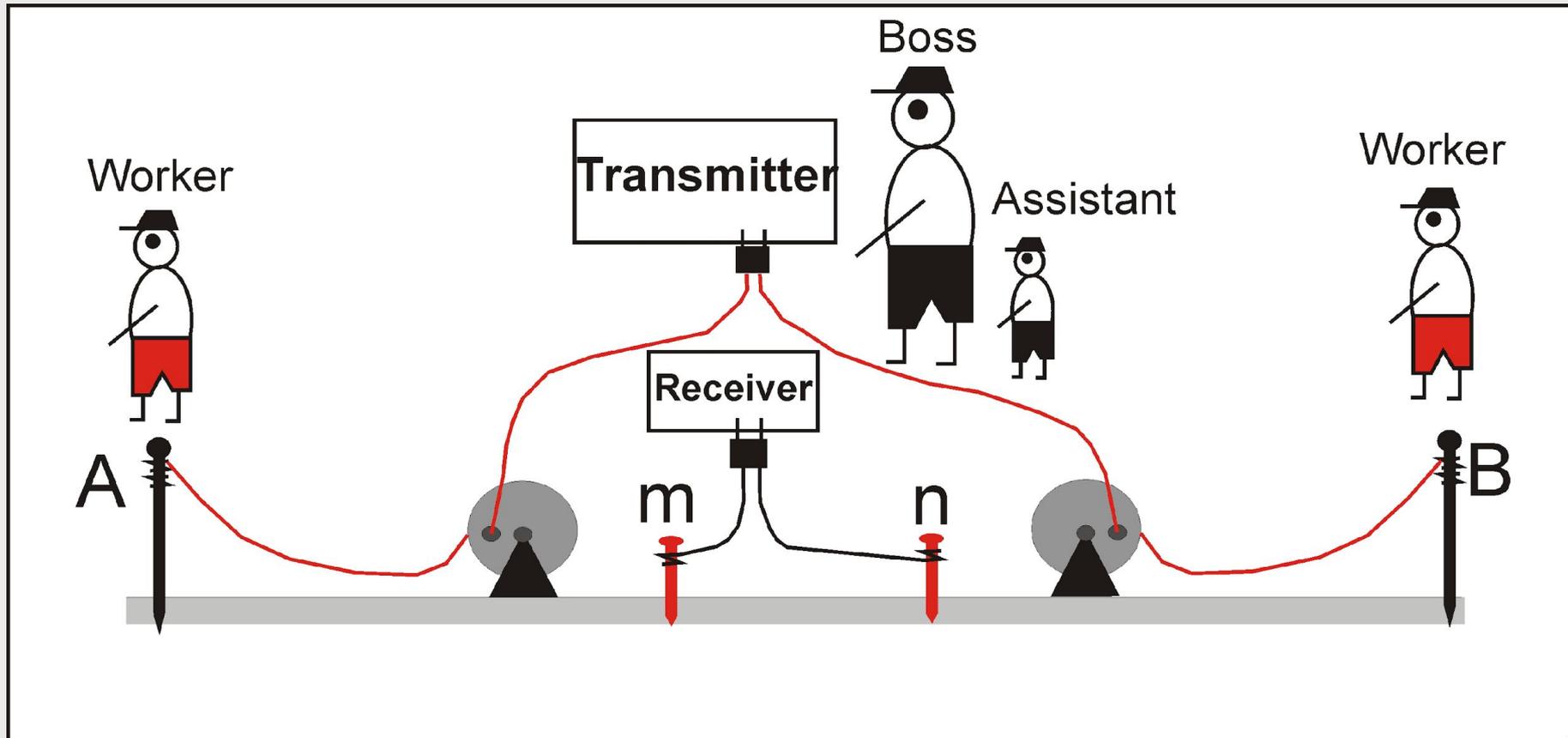
Разных модификаций зондирований несколько десятков, в последнее время зондирования добились заметного развития, повышения производительности, больших возможностей интерпретации и сильно опережают профилирования. Термин зондирование означает изучение разреза от поверхности земли до некоторой глубины, старое название - электробурение. Существует несколько способов увеличить глубину проникновения поля - геометрический (как в методе ВЭЗ, за счет увеличения разноса питающих электродов), частотный (как в методе ЧЗ и МТЗ, высокие частоты проникают на меньшую глубину, а низкие частоты проникают глубже), и временной (как в методе ЗС и ЗСБ, поле на ранних временах после выключения возбуждающего тока проникает на меньшую глубину, а на больших временах проникает глубже).

Метод ВЭЗ

Установка ВЭЗ состоит из двух питающих и двух приемных электродов, соединенных с генератором и измерителем. Хотя ВЭЗ это метод постоянного тока, но в России предпочитают использовать переменный ток низкой частоты. Разносы $AB/2$ возрастают в геометрической прогрессии с коэффициентом 1.2 - 1.5, в МГУ использовали коэффициент 1.39, позволяющий получить целое количество разносов (7) на декаду: 1; 1.39; 1.93; 2.68; 3.73; 5.2; 7.2; 10...

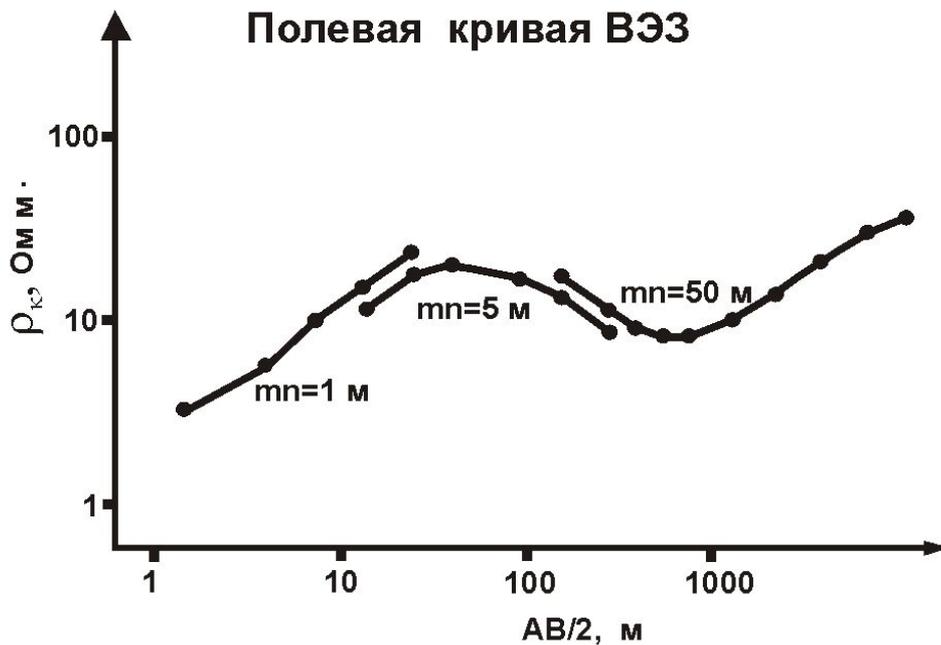
Линия MN может быть меньше или равна $1/3 AB$, но когда отношение AB/MN превышает 10, сигнал в линии MN становится слишком маленьким, и длину MN увеличивают. Переход с одной линии MN на другую происходит на двух разносах AB, это место называют "ворота". Обычно максимальный разнос AB превышает минимальный в 100 и более раз, поэтому на кривой ВЭЗ может быть несколько ворот (2 - 5).

Методика полевых работ



- В центре располагается оператор и его помощник
- Двое рабочих по командам оператора производят перемещение питающих электродов **A** и **B**

Полевая кривая ВЭЗ



Разносы АВ/2(6-7 точек на модуль):

1.39 1.93 2.68 3.72 5.2 7.2 10

13.9 19.3 26.8 37.2 52 72 100

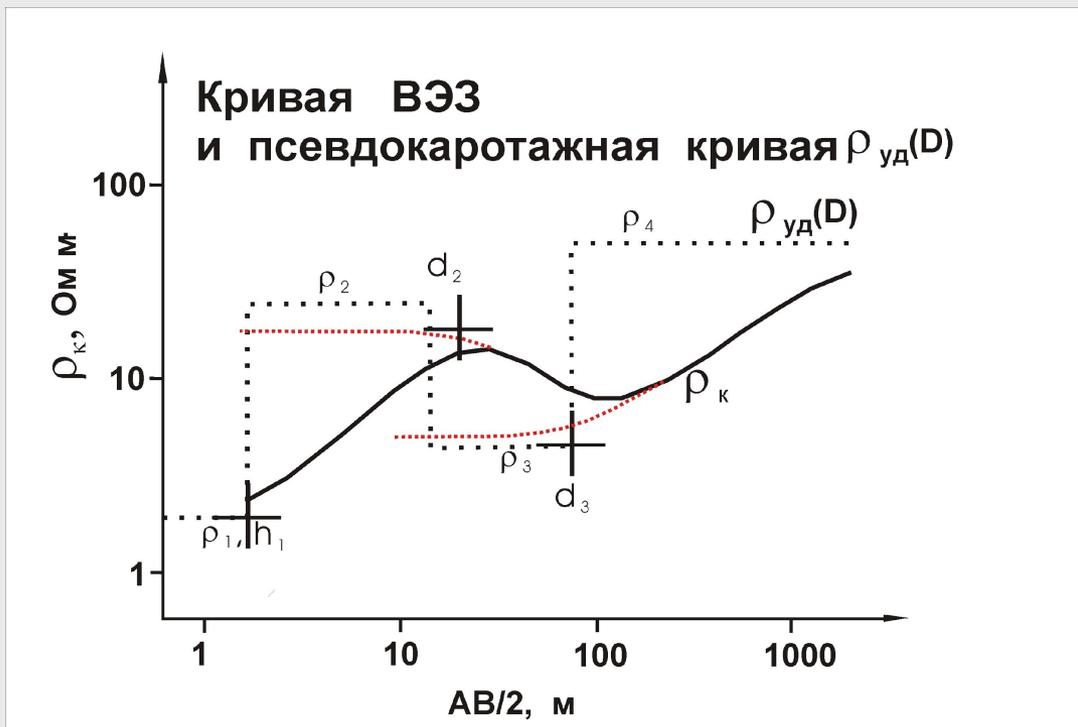
139 193 268 372 520 720 1000...

Полевая кривая обычно состоит из сегментов, полученных при разных длинах приемной линии MN. Кривая ВЭЗ строится в координатах АВ/2 - ρ_k .

Смещение между сегментами называется «воротами», их возникновение частично теоретическое, частично нет.

Разносы возрастают в геометрической прогрессии (в данном случае $K=1.39$), 7 точек на декаду разносов.

Кривая ВЭЗ и ее соответствие геоэлектрическому разрезу



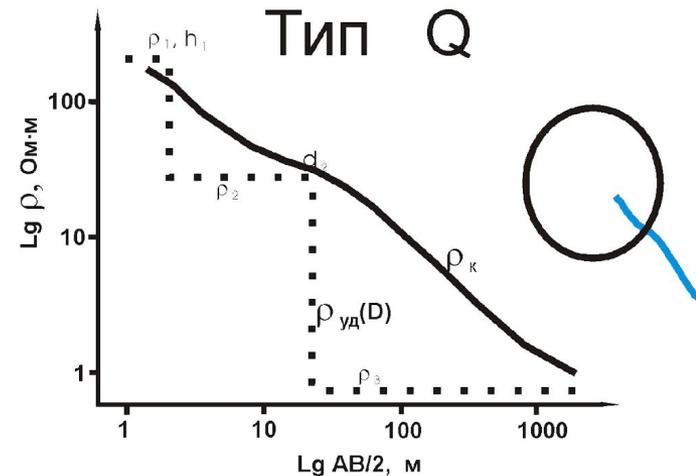
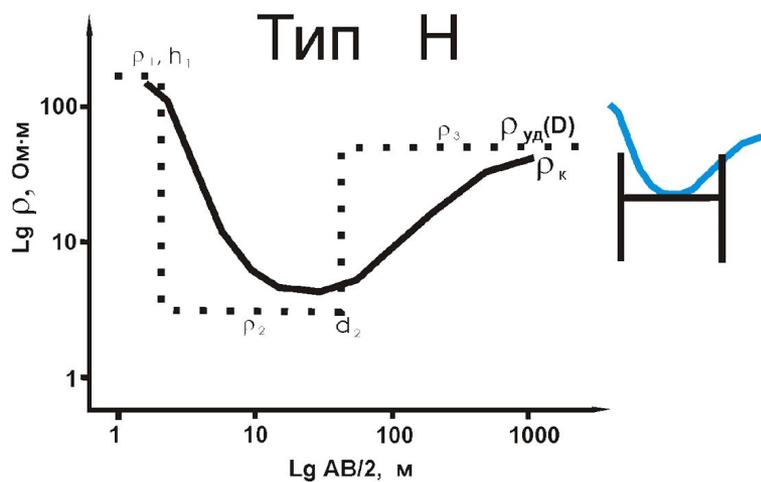
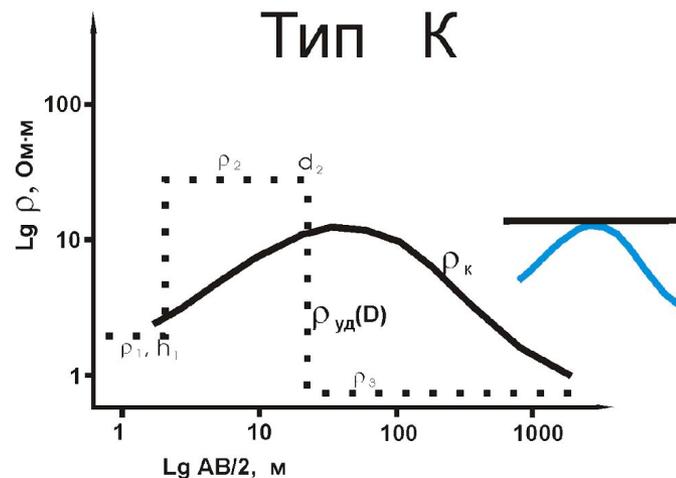
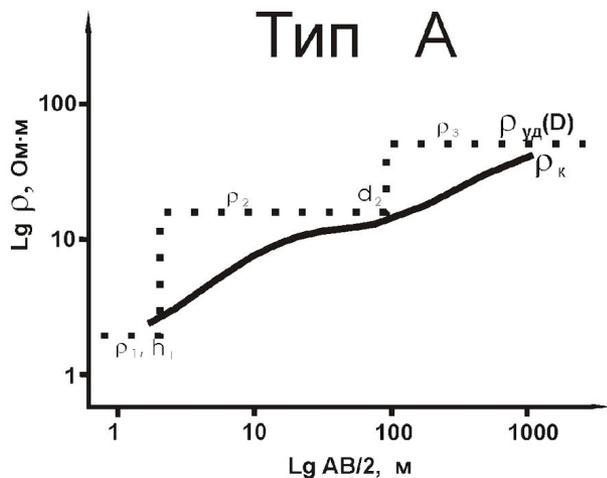
Форма псевдокаротажной кривой (слоистой модели разреза) соответствует форме кривой ВЭЗ

Верхнюю часть разреза можно заменить одним эквивалентным слоем

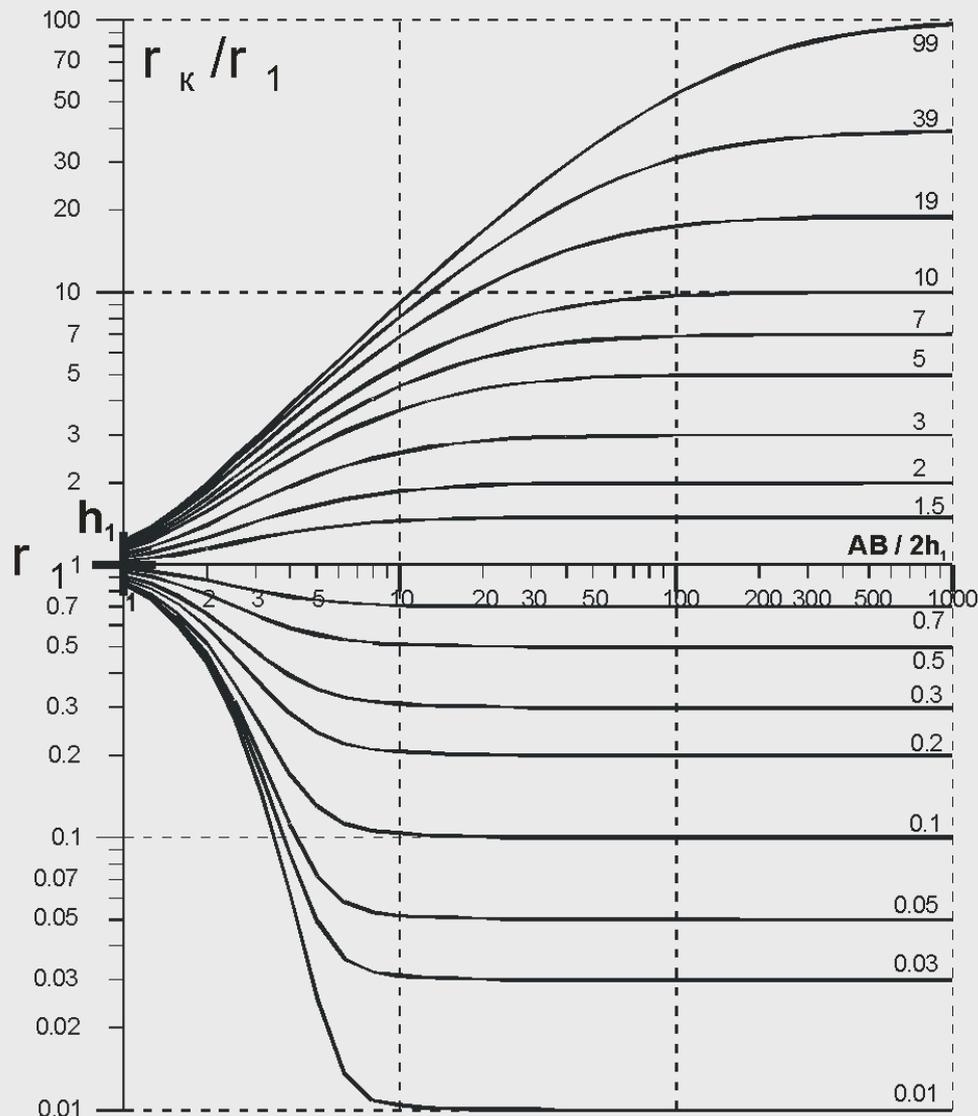
Такое соответствие очень важно для процесса интерпретации, часто число слоев и параметры слоев назначаются (как первое приближение) по виду кривой ВЭЗ. Но для таких оценок важен навык и знание закономерностей кривых ВЭЗ.

Типы трехслойных кривых ВЭЗ

Распознавание типа кривой ВЭЗ по ее внешнему виду очень важно для успеха интерпретации.



Двухслойная палетка ВЭЗ



Если нормировать кажущееся сопротивление на сопротивление первого слоя, а разности на мощность первого слоя, то все случаи 2-х слойного разреза можно описать одной палеткой.

Левая асимптота соответствует сопротивлению первого слоя.

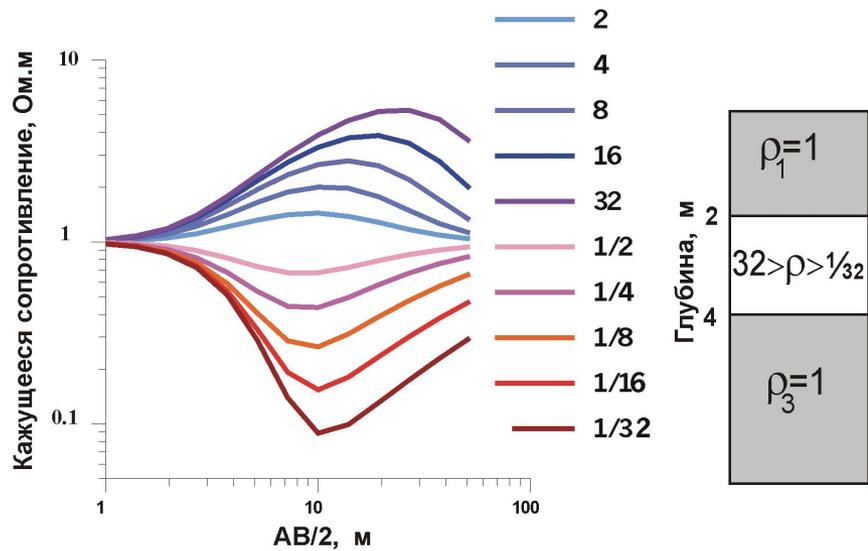
Правая асимптота – сопротивлению второго слоя.

Точка перегиба (крест палетки) попадает на сопротивление первого слоя и его мощность.

Вверх кривые ВЭЗ могут идти под углом не более 45 градусов.

Вниз - с любым углом и быстрее, чем вверх.

Трехслойная палетка ВЭЗ



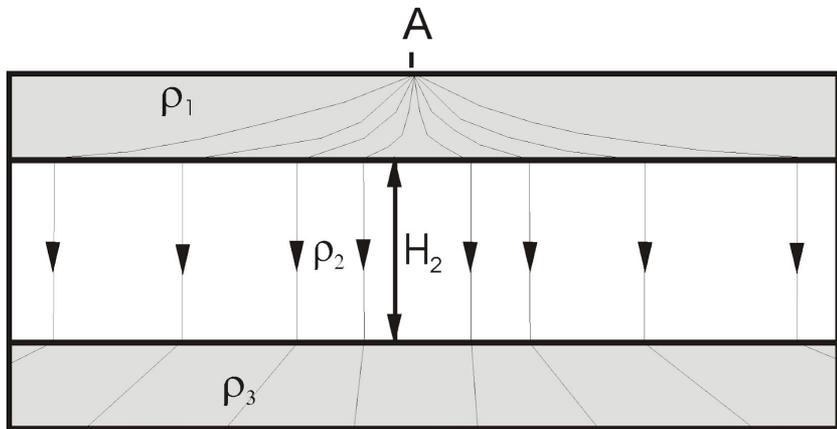
Палетки - основной инструмент геофизиков 60-х - 70-х годов.

Трехслойные палетки ВЭЗ могут быть сведены только в альбом (50-100 страниц).

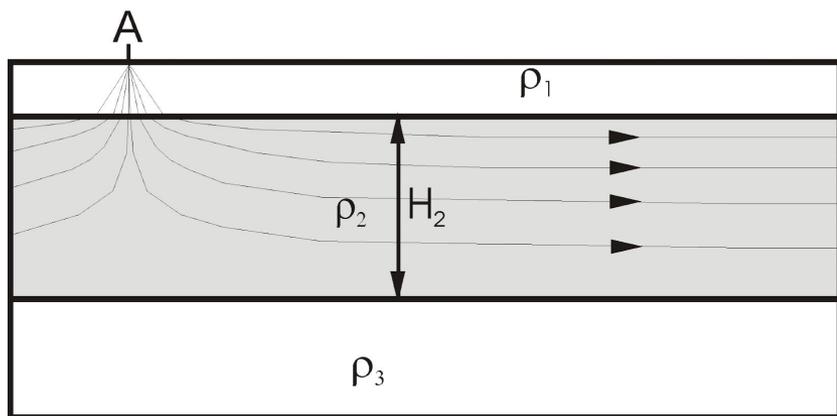
В настоящее время мало кто пользуется палетками вследствие низких производительности и точности интерпретации.

Принцип эквивалентности

Структура токовых линий
в разрезах разного типа



Разрез типа К: $T_2 = H_2 \rho_2$



Разрез типа Н: $S_2 = \frac{H_2}{\rho_2}$

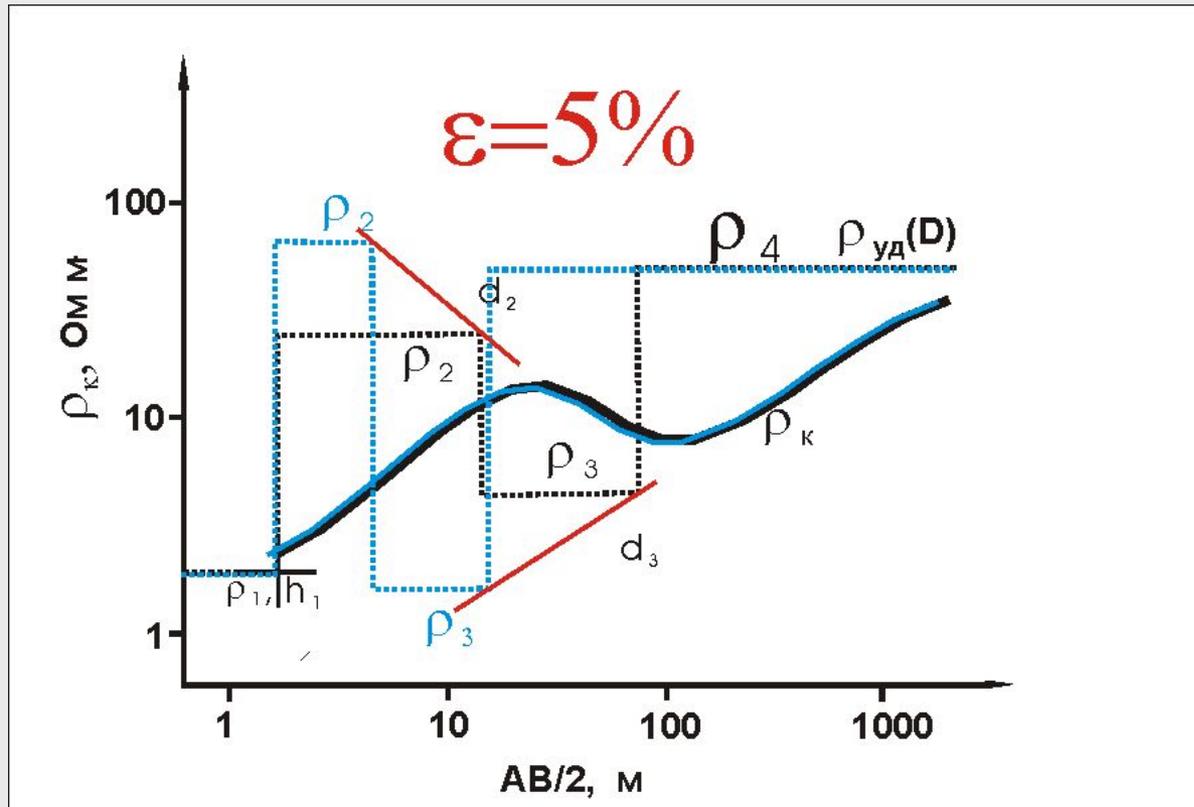
- Для кривых типа К и типа Q (2 и 3 слои) для тонких слоев наблюдается эквивалентность по

$$T_2 = \rho_2 * h_2$$

- Для кривых типа A и типа H для тонких слоев наблюдается эквивалентность по

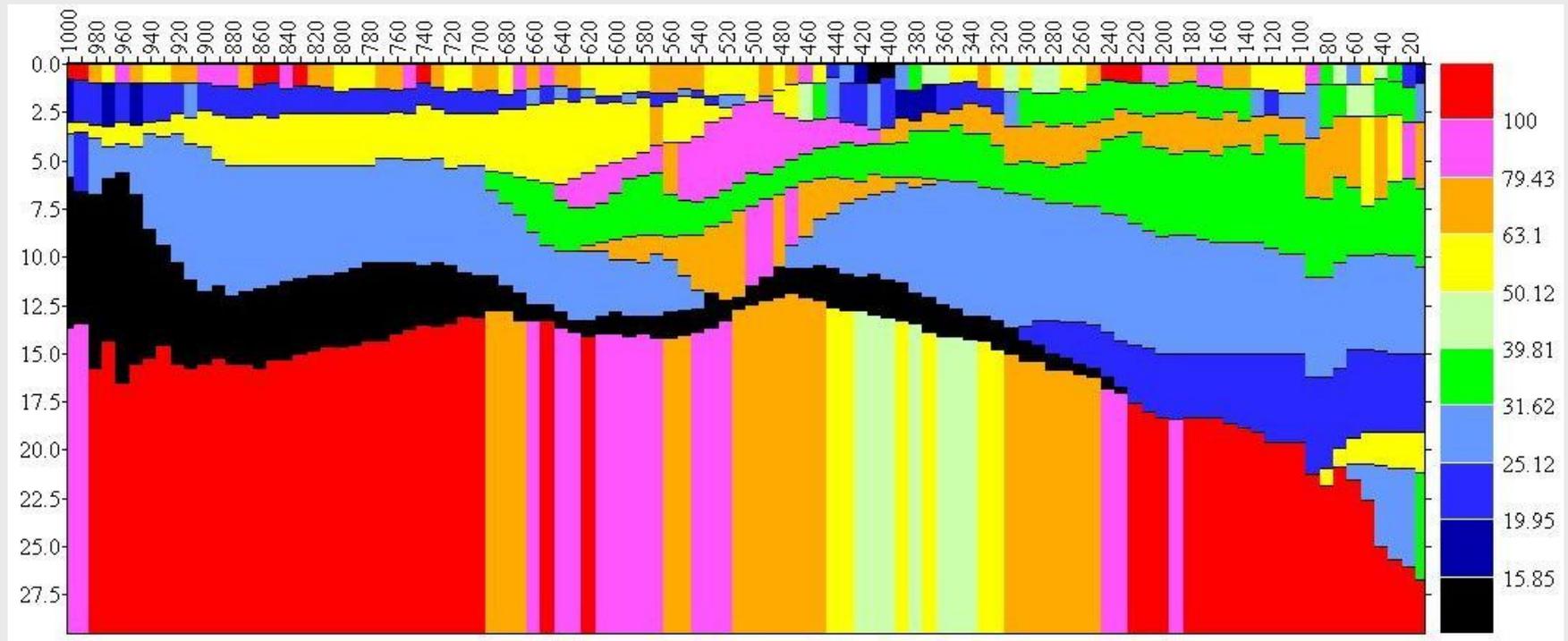
$$S_2 = h_2 / \rho_2$$

Эквивалентные кривые ВЭЗ



Две кривые ВЭЗ, которые соответствуют разным геоэлектрическим разрезам, и различаются в пределах ошибки наблюдений (то есть почти совпадают), называются эквивалентными.

Интерпретация ВЭЗ с IPI2WIN



Геозлектрический разрез по профилю 3 в районе Калуги, 1994 год. На профиле 100 зондирований, в модели до 8 слоев, 1D интерпретация с использованием (априорной) - дополнительной геологической информации.

Дипольные зондирования

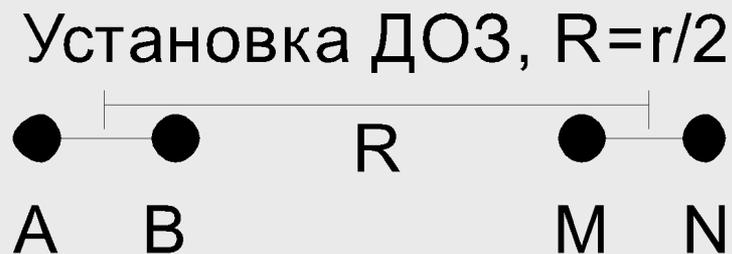
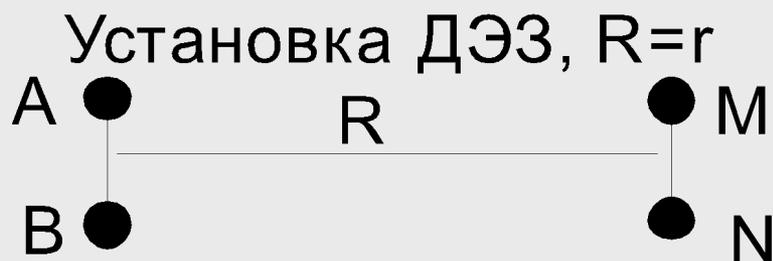
После появления метода ВЭЗ геофизики разных стран пытались с его помощью достичь максимальных глубин.

Нефтяные задачи ВЭЗ в 40 – 50 годы (Татария, Башкирия и др.) АВ до 20 км, глубины до 4 км. Закончились массовыми репрессиями «врагов народа» из-за ошибок в интерпретации. Люди не были виноваты, но были наказаны.

50-е годы, Карелия, разнос АВ до **800** КИЛОМЕТРОВ! Лучшие геофизики Ленинграда в этом участвовали.

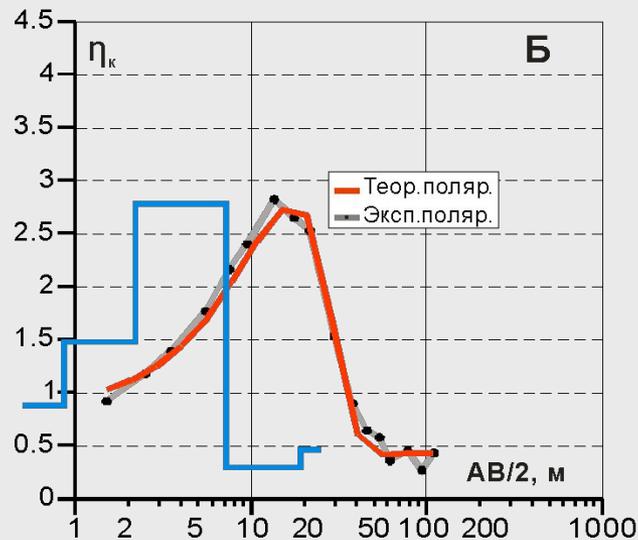
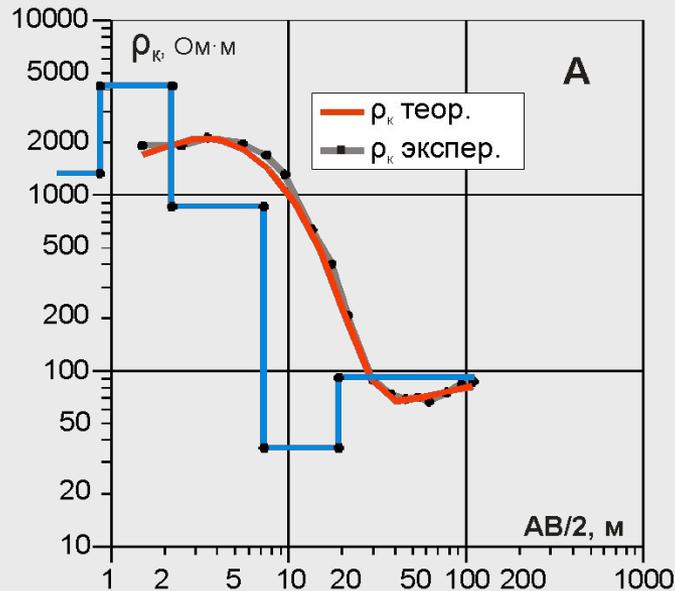
Примерно в эти годы Ю.Африка - АВ до **1500** км, электроды - опоры ЛЭП.

Профессор МГРИ Лев Моисеевич Альпин предложил применять для глубоких ВЭЗ дипольные установки. Преодолевались многие трудности ВЭЗ. Книга Альпина о дипольных зондированиях была переведена на английский язык и издана в США.



Зондирования ВЭЗ-ВП

ВП измеряется аналогично ρ_k на тех же установках, многие годы использовались неполяризуемые электроды в линии MN, но с конца 90-х гг. научились измерять с металлическими электродами. Трудности в том, что сигнал ВП в 100 раз слабее сигнала при пропускании тока, приходится пропускать большие токи и использовать другие методические приемы для правильного измерения ВП. Каждое зондирование содержит две кривые: ρ_k и ВП. Кроме сопротивления слоев при интерпретации получают и ВП слоев (поляризуемость).



А - кривая ВЭЗ

Б - кривая ВП

Электротомография

В 1995 году в мире возникла новая технология - электротомография (ЭТ), как развитие методов ВЭЗ и ЭП. Элементы этой технологии вызревали лет 10, но главный прорыв был получен с появлением алгоритма и программы 2D инверсии, разработанной аспирантом из Малайзии М.Локе, который учился в Англии у проф. Р.Баркера.

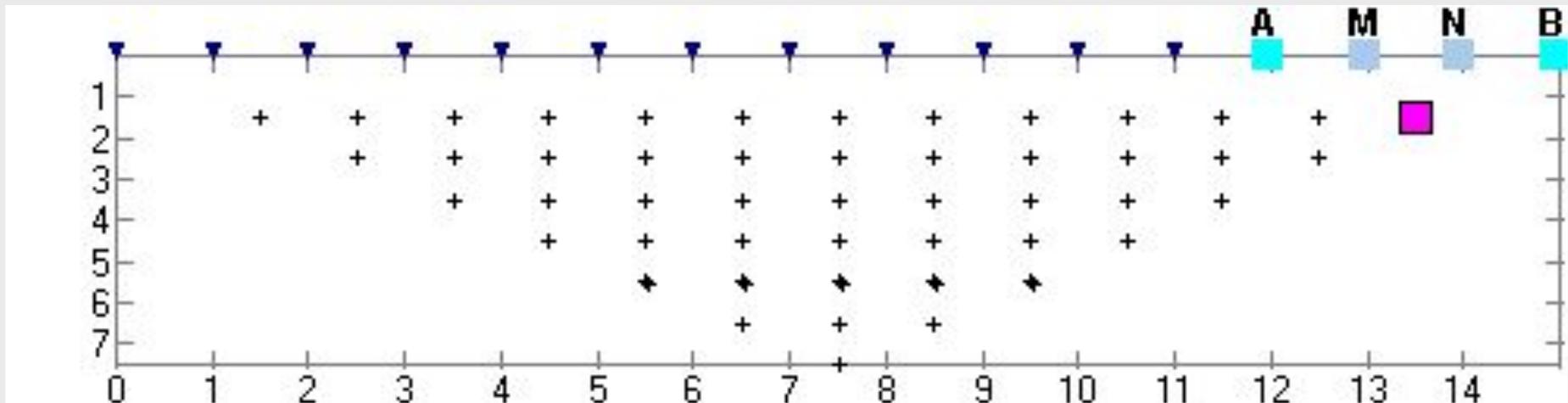


Сейчас ЭТ это самая употребительная технология в электроразведке, далеко продвинувшая возможности электрических зондирований на постоянном токе. Очень удобной оказалась программа 2D инверсии Res2DInv (М.Локе, Малайзия). Хотя проблемы этой программы существуют и известны, удобство от ее использования (и дружественный интерфейс) видимо перевешивает ее недостатки.

Отличия электротомографии от ВЭЗ

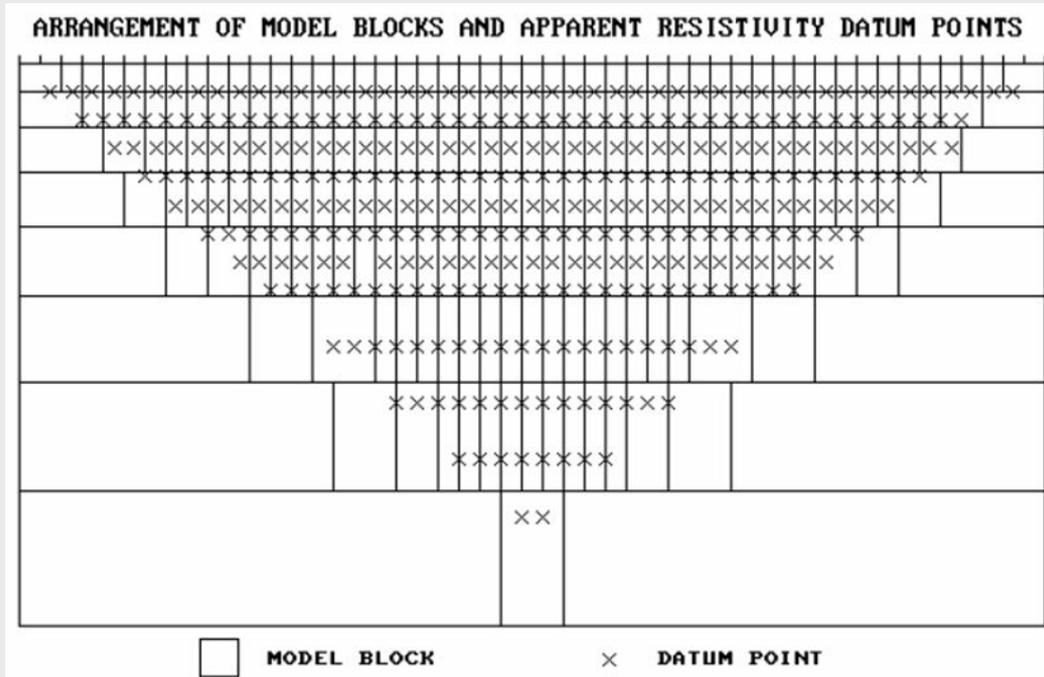
Представим себе профиль ВЭЗ с максимальным разнесом $AB/2=100$ м и шагом ВЭЗ 10 м. Перенос электроды и провода (А, В) нам придется пройти мимо соседней точки ВЭЗ почти 10 раз. Давайте забудем все электроды заранее, подключим к многожильному кабелю и будем переключать разности без лишней ходьбы по профилю. Это первый шаг к томографии.

Если продумать систему коммутации, то можно с помощью многожильного кабеля сделать не одно зондирование, а все зондирования одного профиля (одной расстановки электродов). Тогда точки записи этого профиля будут иметь вид трапеции.



Эта картинка сделана доцентом Бобачевым. Это второй шаг томографии.

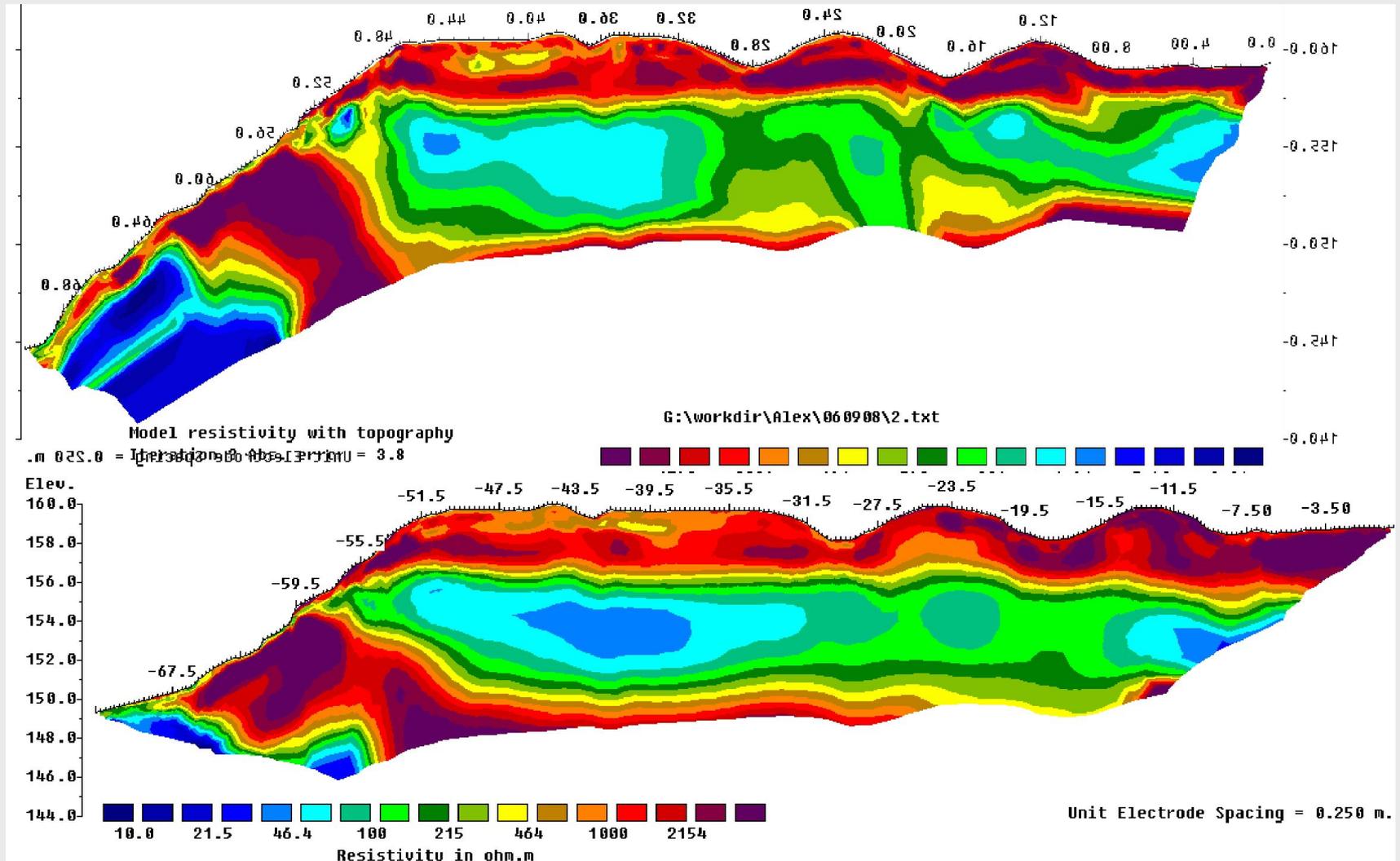
Отличия электротомографии от ВЭЗ



Следующая идея положена в основу модели 2D инверсии: Разрез делится на слои по глубине, их мощность слабо растет в геометрической прогрессии, каждый слой делится на блоки (кирпичики), их ширина одинакова (кроме краев модели). Размеры блоков в ходе инверсии не меняются, подбираются только сопротивления блоков.

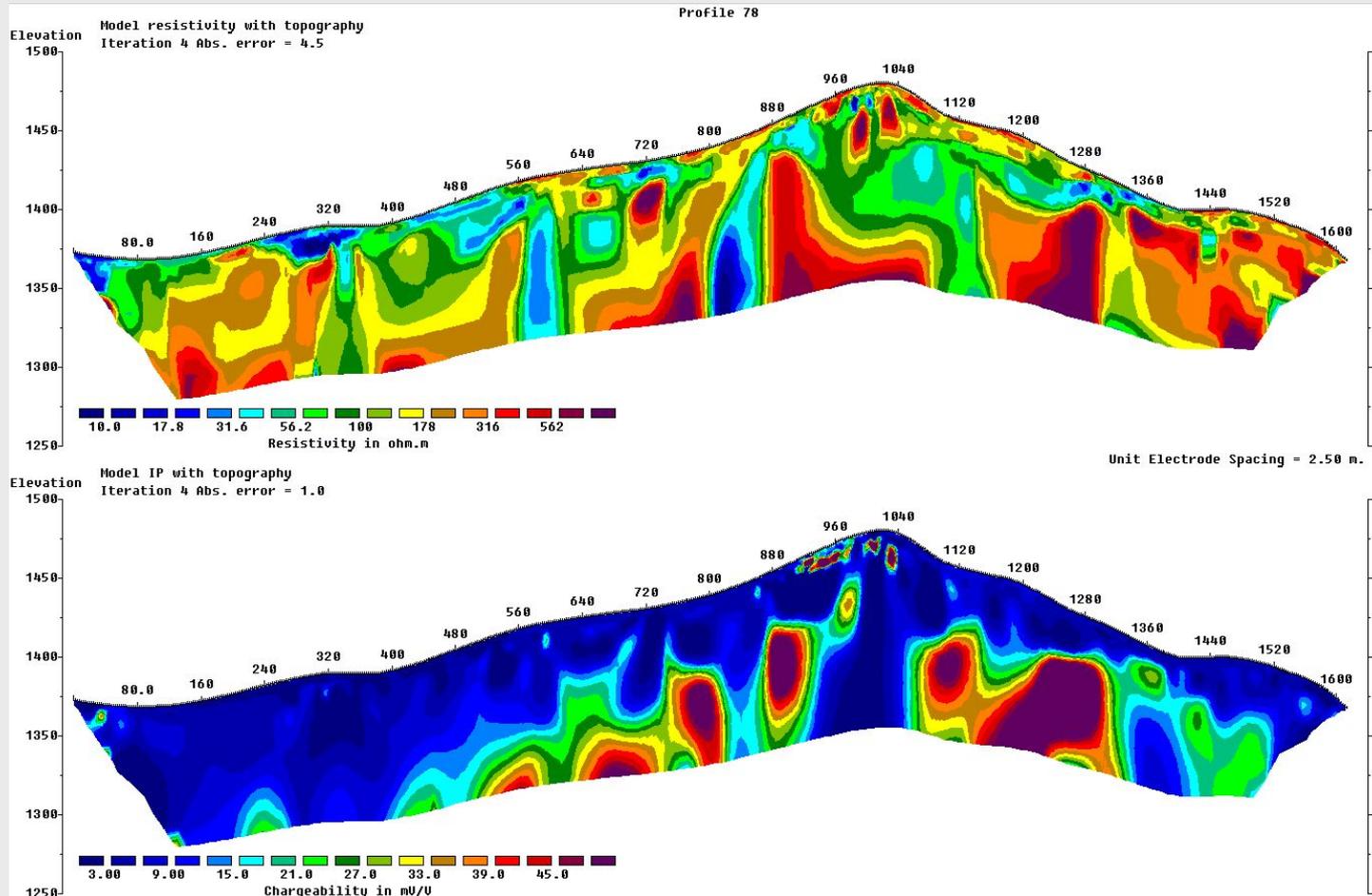
Эта модель используется для 2D инверсии. В инверсии участвуют все точки измерения по профилю и все разносы. И все установки, если их было несколько. Модель единая для профиля. В методе ВЭЗ каждая точка (кривая ВЭЗ) интерпретировалась отдельно и независимо от других. И сеть ВЭЗ была редкая. В 2D электроразведке используется частая сеть наблюдений и единая модель. 2D инверсия это главное в электротомографии.

Пример ЭТ, Практика МГУ, Алекс. городище



2D инверсия работает с данными, полученными на рельефе

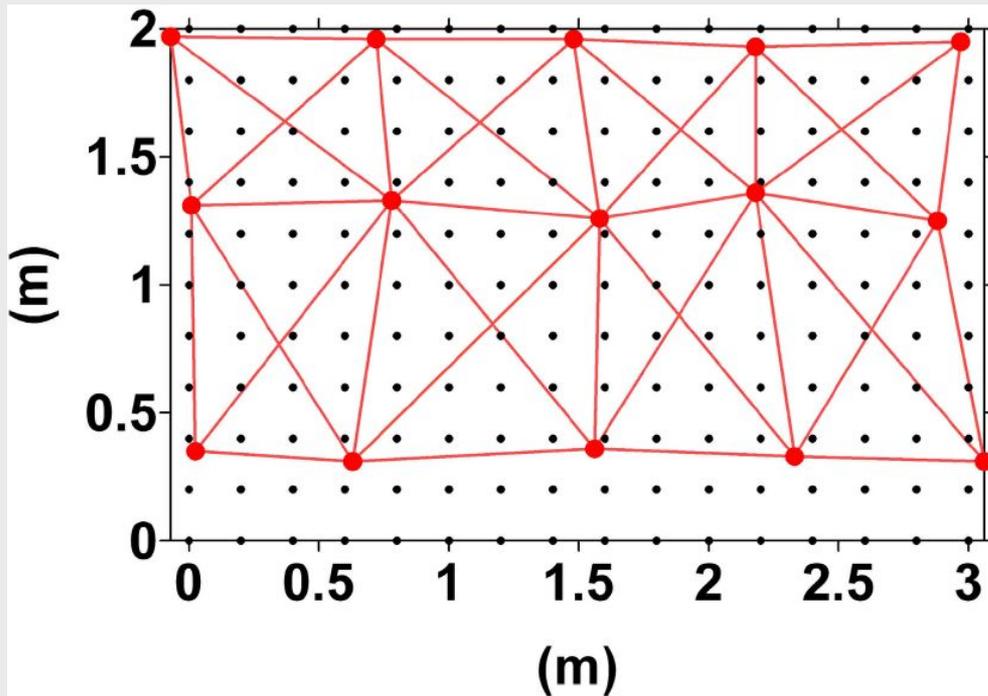
Азербайджан-2008, Карадаг



Результат МГУ и "Северо-Запад", Syscal-Pro. Глубина 100 м.
Разрез сопротивлений (вверху), и ВП (внизу). Поиск рудных тел.

Немного о 3D томографии

Почему в настоящее время в основном применяют 2D наблюдения в ЭТ, а 3D менее востребованы. Ведь реальные объекты конечно 3D. Не хватает времени, кабелей, электродов, возможностей аппаратуры. Фирма AGIUSA подсчитала, что 3D участок это примерно 50 тысяч измерений, а 2D это 1 тысяча измерений. Косы на 24, 36, даже 72 электрода слабо подходят для 3D. Один путь - наращивать технические возможности, а другой - оптимизировать системы наблюдений. По второму пути пошли итальянские геофизики из Ун-та Палермо. Они предложили установку MYG для 3D ЭТ.



Черные точки - приемные электроды, красные точки - питающие электроды, красные линии - питающие диполи. Из 256 электродов только 18 были питающими. Время работы с новой установкой в 20 раз меньше, чем для классических 3D установок.

Изучение древней стены здания, покрытой ценной мозаикой



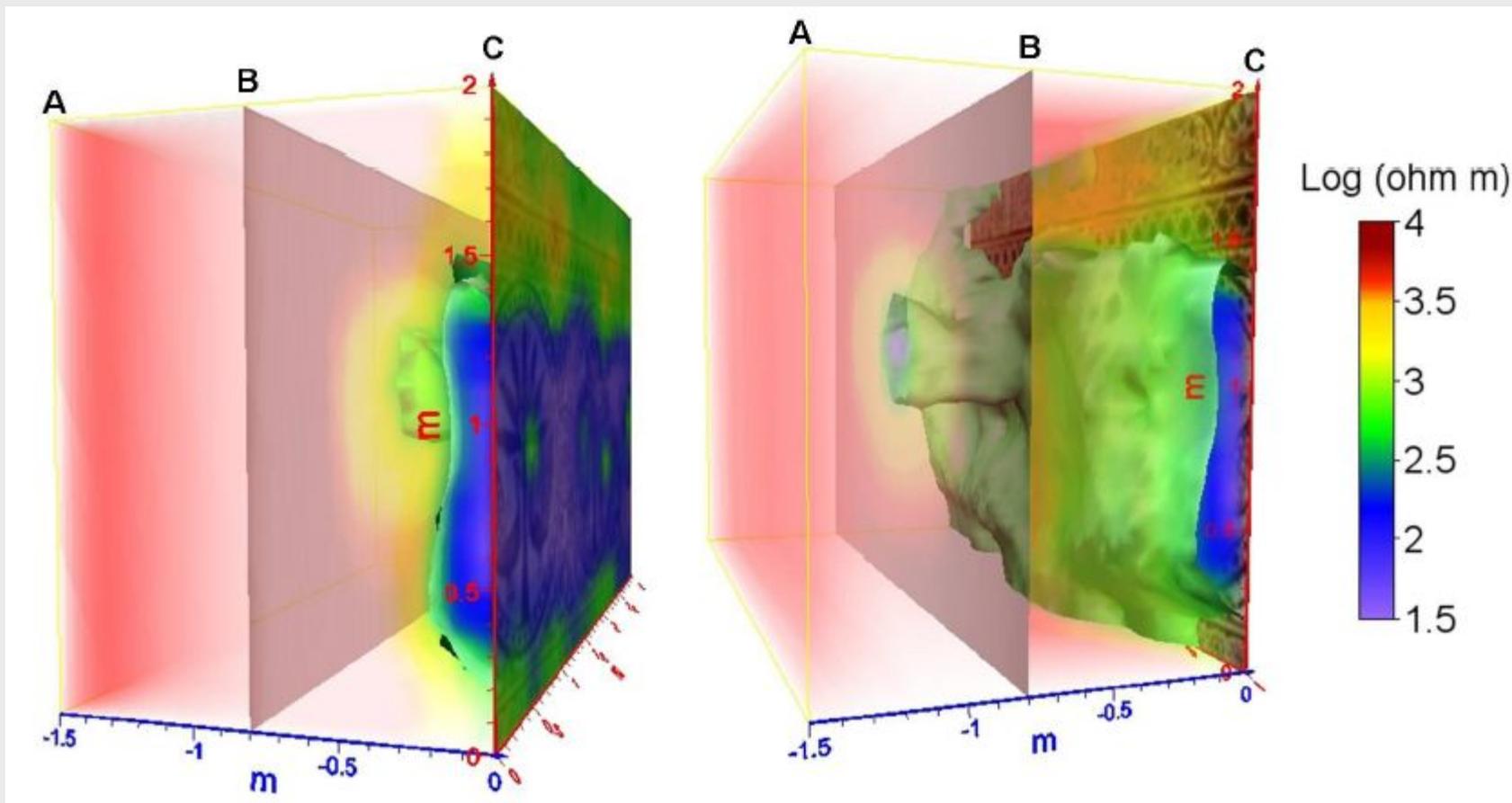
Дворец Лизы в Палермо, 12 век



Настенная мозаика, которая начала повреждаться по неизвестной причине.

Для выяснения применили 3D ЭТ в пределах участка 2 на 3 м, показан справа красными линиями. Стена с мозаикой стала поверхностью для 3D томографии. Это аппаратура, питающие и приемные электроды, косы, спланированная система наблюдений, оптимизированная по условиям применения, обработка и, наконец, инверсия. Питающих электродов минимум, приемные на присосках.

Результаты 3D инверсии



Плоскость а - наружная сторона стены здания, плоскость с - мозаика, плоскость наблюдений, плоскость b - глубина изучения. Обнаружен канал, по которому влага из разрушенной старой водопроводной трубы поступает к мозаике и повреждает ее.

Частотное зондирование

Время рождения – 50-е годы, массовые исследования нефтеносных структур
Главная проблема – невозможность изучения разреза под слоями-экранами (изоляторами).

Идея ЧЗ была предложена А.П.Краевым в 1941 г.

Наиболее полно теория ЧЗ была разработана Л.Л.Ваньяном.

Частотное зондирование может выполняться на одном фиксированном разносе, меняется только частота, типичный индуктивный метод, зондирование на основе скин-эффекта. Высокие частоты проникают на меньшую глубину, а низкие частоты - на большую. Формула скин-эффекта:

$$h_{\delta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{10^7 \rho / f} \quad f - \text{частота, } \rho - \text{сопротивление среды}$$

В методе ЧЗ используют два типа источников:

Горизонтальный электрический диполь (ГЭД – линия АВ)

Вертикальный магнитный диполь (ВМД – петля Q)

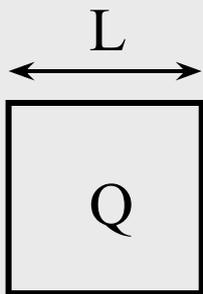
Методика работ ЧЗ

Источники
поля



$AB \sim 1 \text{ км}$

$r \sim 5-10$
км



$L \sim 1 \text{ км}$

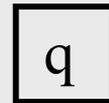
Поле ВМД убывает быстрее

Датчики

линия MN с
металлическими
электродами



H_z -
многовитковая
петля



H_y -
индукционный
датчик

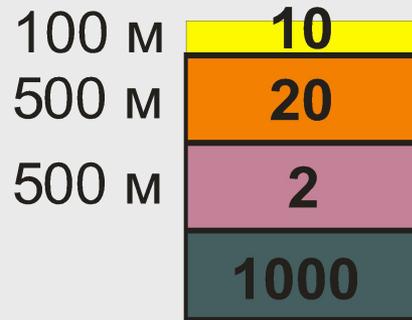
датчик ○

Аппаратура ЧЗ для мерзлоты

Кроме глубинных исследований иногда применяют ЧЗ для малоглубинных работ. На кафедре мерзловедения МГУ (Кошурников А.В.) разработана аппаратура ЧЗ (HF-EM), частоты 4 до 512 кГц, разнос 40 м. Новизна в том, что измерения выполняются на фиксированных частотах (помехоустойчиво), а переключение частот выполняется автоматически и синхронно с частотами генератора. На регистрацию кривой ЧЗ требуется время около 1 мин.



Кривые ЧЗ

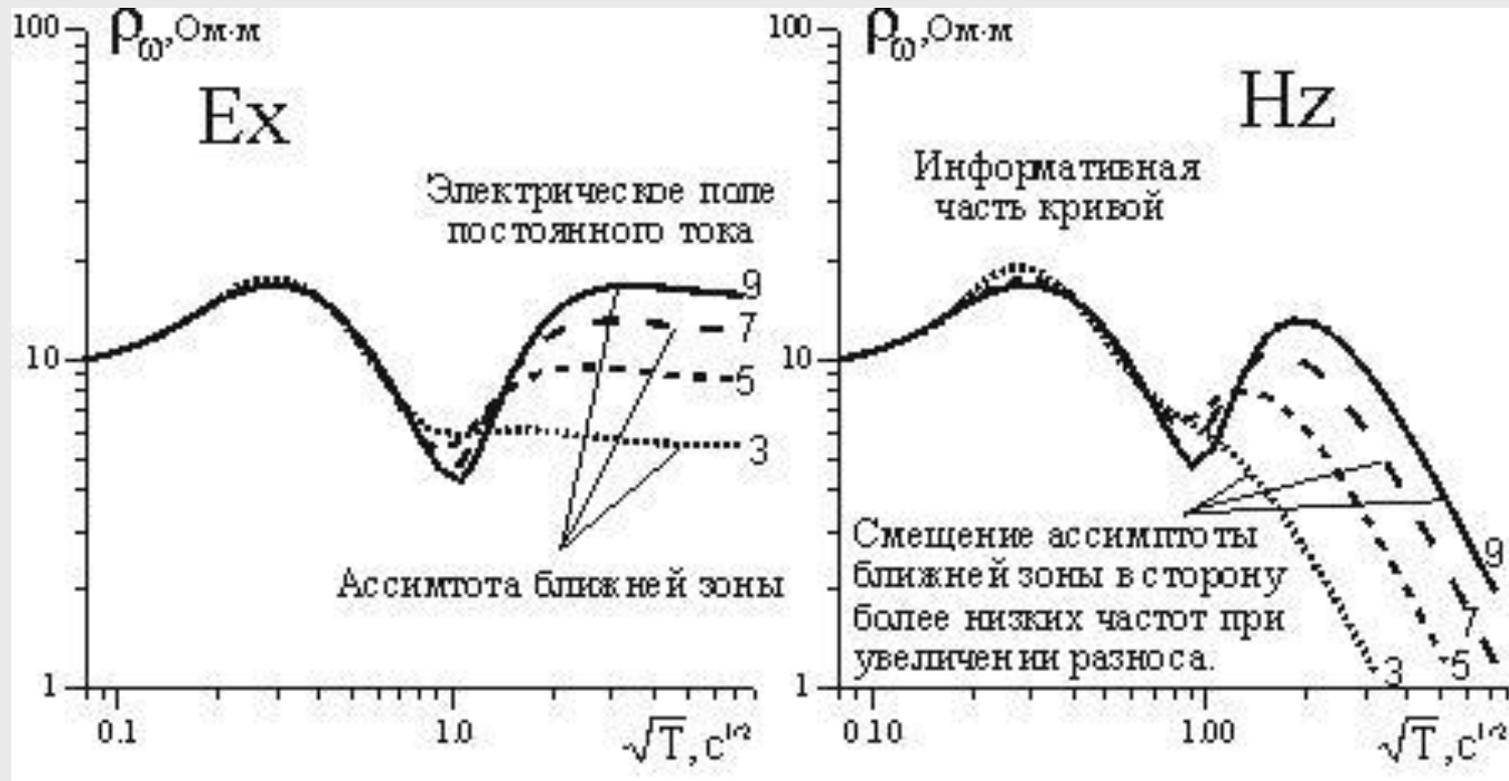


$$\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad h_1 = 100 \text{ м}$$

$$\rho_2 = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad h_2 = 500 \text{ м}$$

$$\rho_3 = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad h_3 = 500 \text{ м}$$

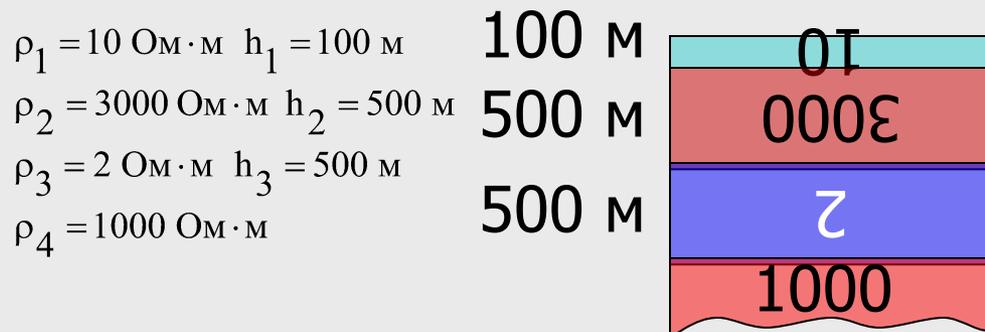
$$\rho_4 = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$



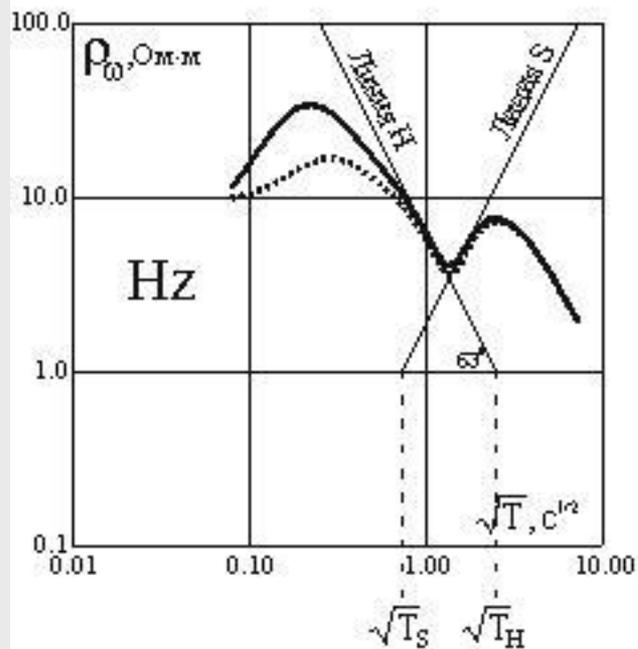
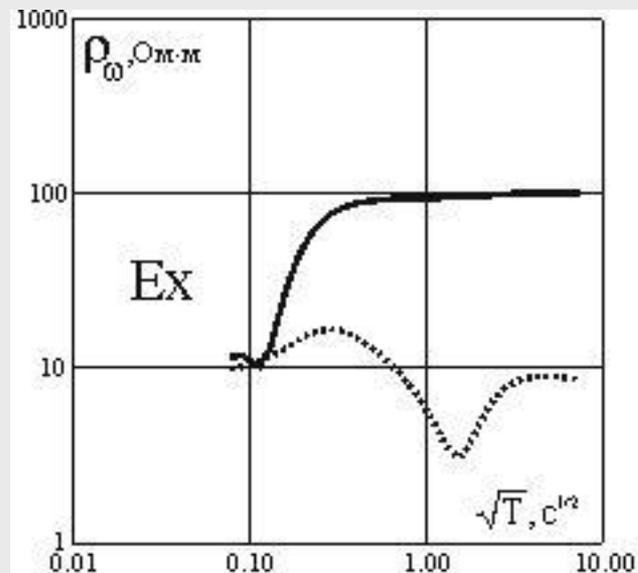
Влияние экрана

Именно этот фактор сильнее всего повлиял на рождение и развитие метода ЧЗ

Модель А (с экраном - D_3)



Модель В (без экрана)



— кривые ЧЗ для модели А
 кривые ЧЗ для модели В

Преимущества метода ЧЗ

Частотное зондирование, в сравнении с другими электромагнитными зондированиями, обладает рядом преимуществ:

1. Высокоомные экраны не являются помехой для магнитных компонент поля электрического диполя и всех компонент поля магнитного диполя;
2. Измерения на одном разносе снижают трудозатраты;
3. Использование при интерпретации магнитных и электрических компонент поля дает возможность получать более разнообразную информацию о разрезе;
4. Измерения на фиксированных частотах позволяют использовать узкополосную фильтрацию, что заметно повышает помехоустойчивость.

Недостатки метода ЧЗ

К слабым сторонам метода можно отнести:

1. Неопределенность с точкой записи (основная проблема метода ЧЗ), выход - импедансные измерения или двусторонние, взаимно-встречные установки;
2. В районах с экраном электрическая компонента поля электрического диполя не несет информации о подэкранной толщине;
3. Вертикальная составляющая магнитного поля (наиболее часто используемая) очень чувствительна к горизонтальным неоднородностям;
4. Необходимо использовать мощные источники поля (ДЗ), что снижает производительность и повышает стоимость работ.
5. Часть кривой ЧЗ выходит в ближнюю зону и теряет связь с разрезом.

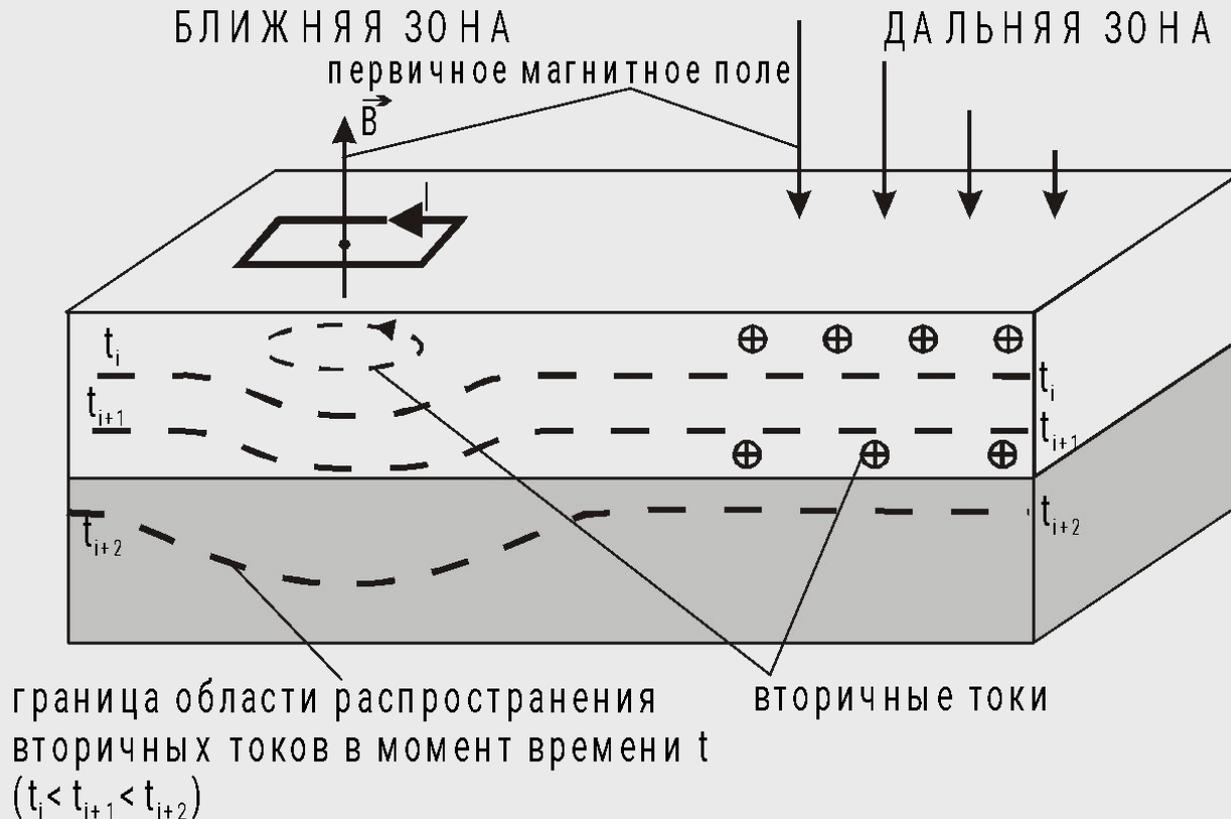
Появление метода ЗС в ближней зоне - ЗСБ, (что для ЧЗ невозможно) очень сильно снизило востребованность метода ЧЗ.

Метод становления поля (ЗС, ЗСБ)

Метод ЗС может работать в дальней и ближней зоне. В дальней зоне это аналог ЧЗ. В ближней зоне это новый метод, т.к. ЧЗ в ближней зоне практически невозможно.

Для ближней зоны r/t – приведенное расстояние $\ll 1$ $\tau = \sqrt{2 \pi 10^7 \rho t}$

Для дальней зоны r/t – приведенное расстояние $\gg 1$



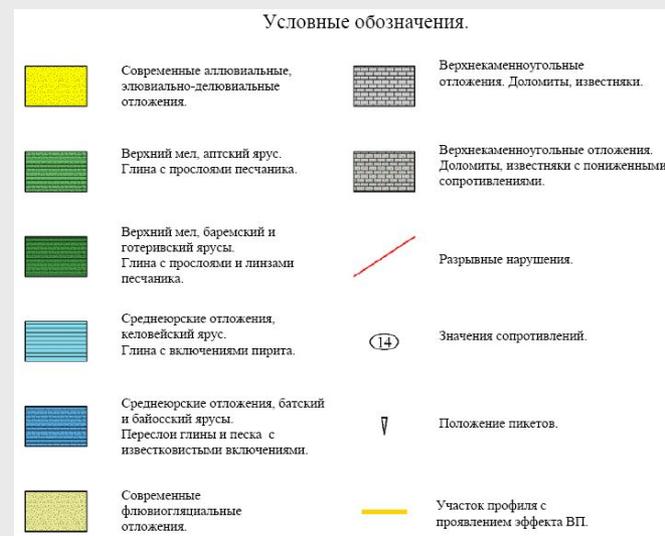
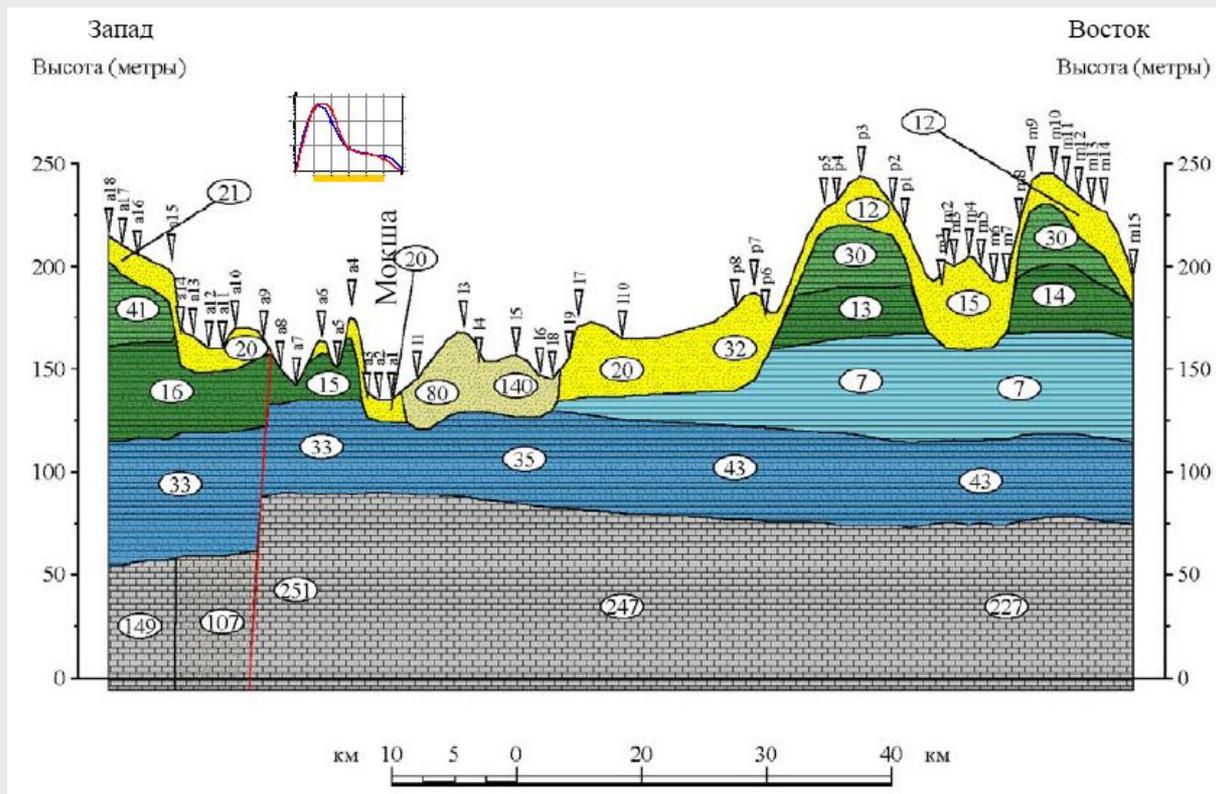
Преимущества метода ЗСБ

1. не требуется создавать заземления, что позволяет работать на скальных грунтах, на мерзлоте, и зимой (когда источник - петля);
2. электромагнитное поле содержит только индукционную составляющую, на которой не сказывается влияние высокоомных экранов;
3. компонента Hz является наиболее слабой в магнитотеллурическом поле, которое является помехой;
4. при возбуждении и приеме магнитного поля слабо влияют локальные приповерхностные неоднородности, являющиеся геологическими помехами;
5. наблюдаемое электромагнитное поле **после выключения** тока является чисто аномальным.

Основные недостатки ЗСБ

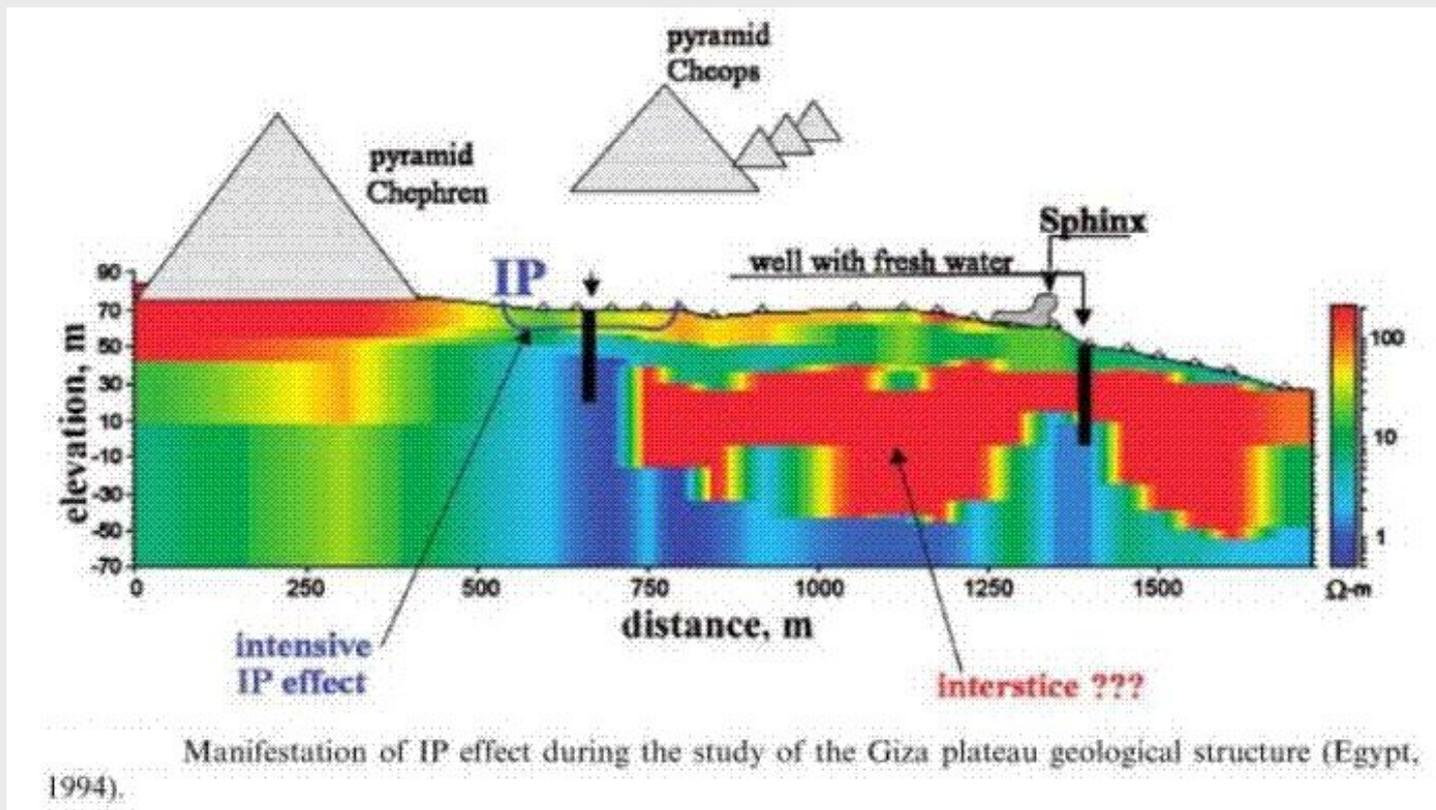
- 1. Определенные трудности вызывает интерпретация данных ЗСБ в неоднородных средах, что обусловлено сложной структурой поля переходных процессов.
- 2. Реальная глубинность исследования методом ЗСБ ограничивается первыми километрами, так как дальнейшее увеличение глубинности приводит к резкому увеличению затрат по созданию установок.
- 3. Сильные искажения кривых ЗСБ возникают при наличии металлического мусора, проводов и кабелей. Враг N1 - железные заборы.

ЗСБ с TEM-Fast в Мордовии



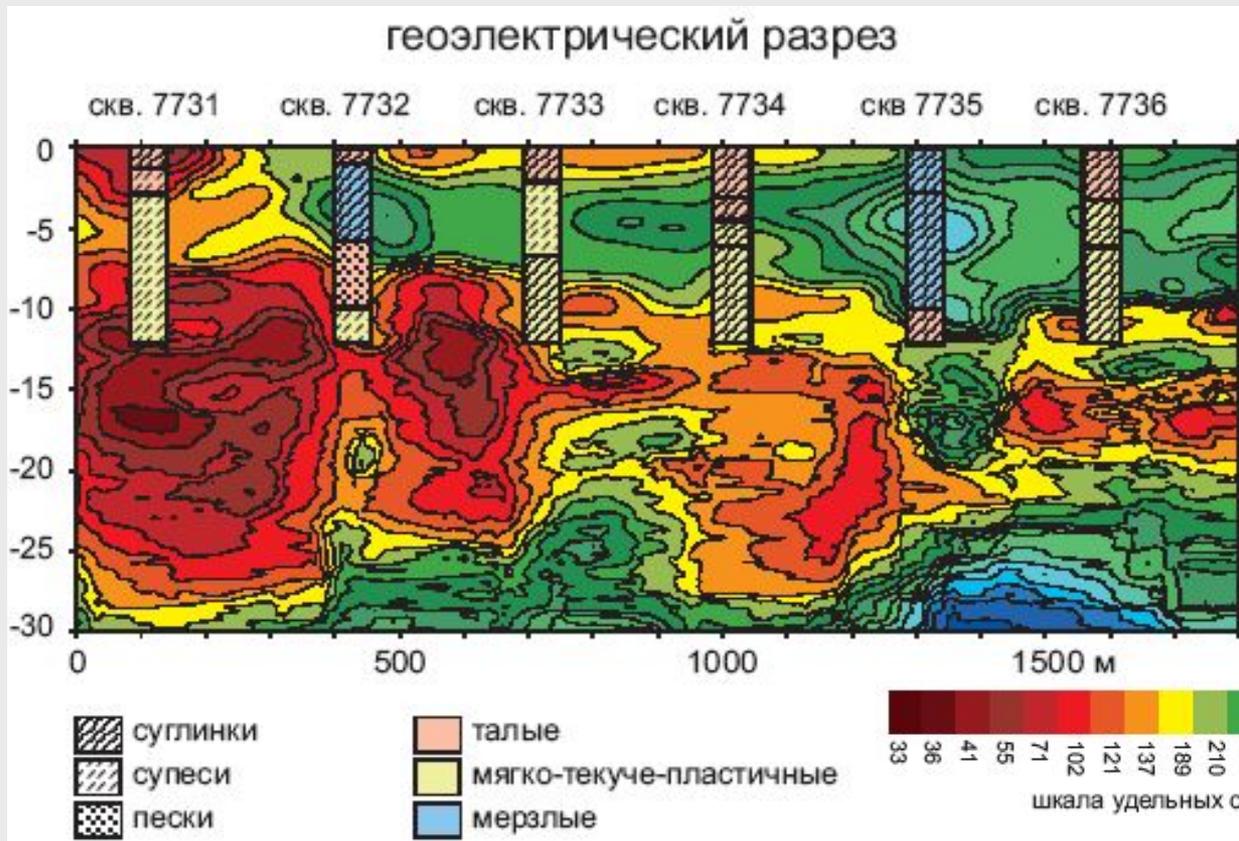
Глубина зондирования около 200 м, выделено до 6 слоев, профиль длиной 100 км

Работы ЗСБ с TEM-Fast в Египте



Работы в Гизе совместно с NRIAG как чисто геологические исследования, но привели к неожиданным результатам. Между пирамидами Хеопса и Хефрена и Сфинксом нашли участок с аномально высокой проводимостью. Полагали, что участок сложен кавернозными известняками плато Гиза, которые содержат минерализованную воду и поэтому обладают низким сопротивлением. В 2000 году на этом месте были открыты подземные галереи. Вблизи пирамиды Хефрена были обнаружены сильные аномалии ВП (в данных TEM).

ООО «НК «Роснефть» — НТЦ», г. Краснодар ООО «ГП «Сибгеотех»», Новосибирск



Обратная шкала цветов
(красные - низкие сопротивления, синие - высокие сопротивления, принята при изучении мерзлоты)

Использование современной аппаратуры ЗСБ «Импульс-А»: А1, А2 (СНИИГГиМС), А3, А4 (Сибгеотех) и программного обеспечения для 2D инверсии (М.Г. Персова) дает возможность строить геоэлектрические разрезы от 0 (что неправда), но от первых метров, до 30 метров. Для ЗСБ - труднейший диапазон, легче от 30 до 300 м. Результаты **Ю.Ю.Дмитриева**.

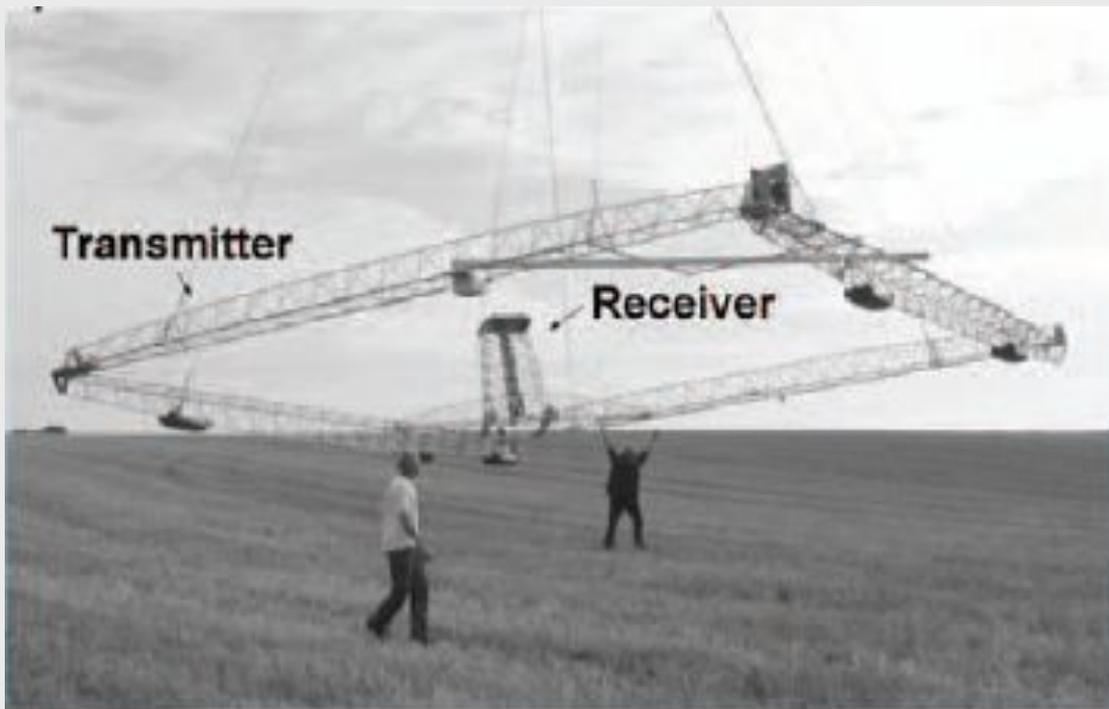
ЗСБ с поверхности воды



Соосная генераторно-измерительная установка (по Ю.Ю. Дмитриеву). Генераторная антенна, имеет момент 157 м^2 и обеспечивает глубинность исследований от **25 м до 40 м при толщине слоя воды до 10 м.** Измерительная антенна закреплена в центре генераторной петли.

Возможен вариант, когда генераторная петля закреплена на берегу, а измерительная перемещается по воде, опробовано в 2004 г. Для рек шириной до 800 м.

ЗСБ с вертолета (Дания)



Дания, университет г. Орхус. SkyTEM system.
Рамка сделана из деревянных планок, и кабеля.
Рамка $12.5 \times 12.5 \text{ m}^2$. 4 витка или 1. Ток 50 А.

Система работает автоматически, в воздухе только пилот. Вес аппаратуры 280 кг. Вся аппаратура вне вертолета, не нужно получать разрешения на размещение внутри. Непрерывная работа 2 часа, это больше, чем время полета вертолета (1.5 ч), ему надо чаще заправляться.

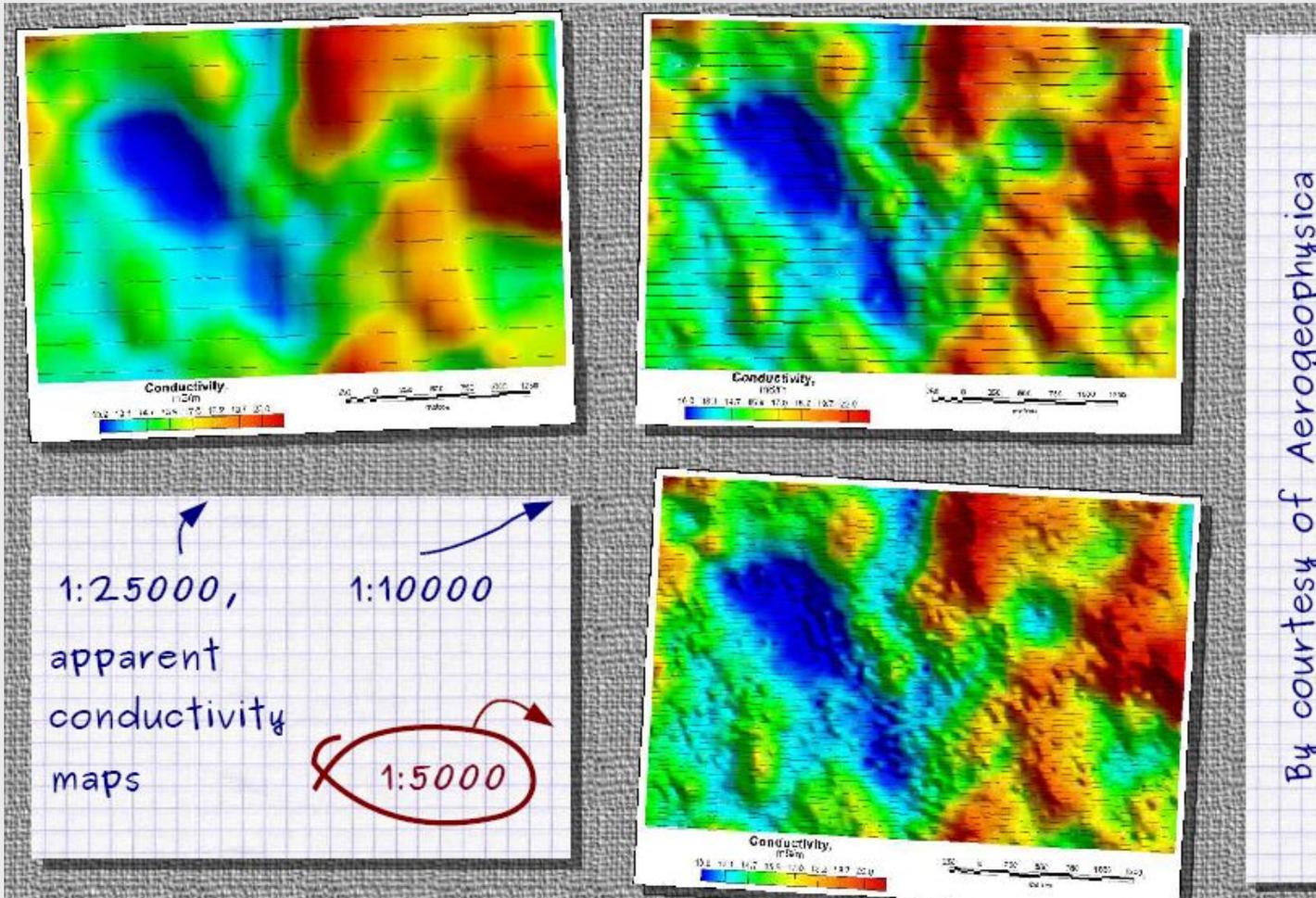
Метод ЗСБ аэро в России



Институт проблем управления
РАН, ЗАО «Геотехнологии»,
аппаратура ЭКВАТОР.
Вертолетная съемка -
генераторная рамка (слева)
измерительная гондола (справа)



Вертолетная съемка в районе Архангельска

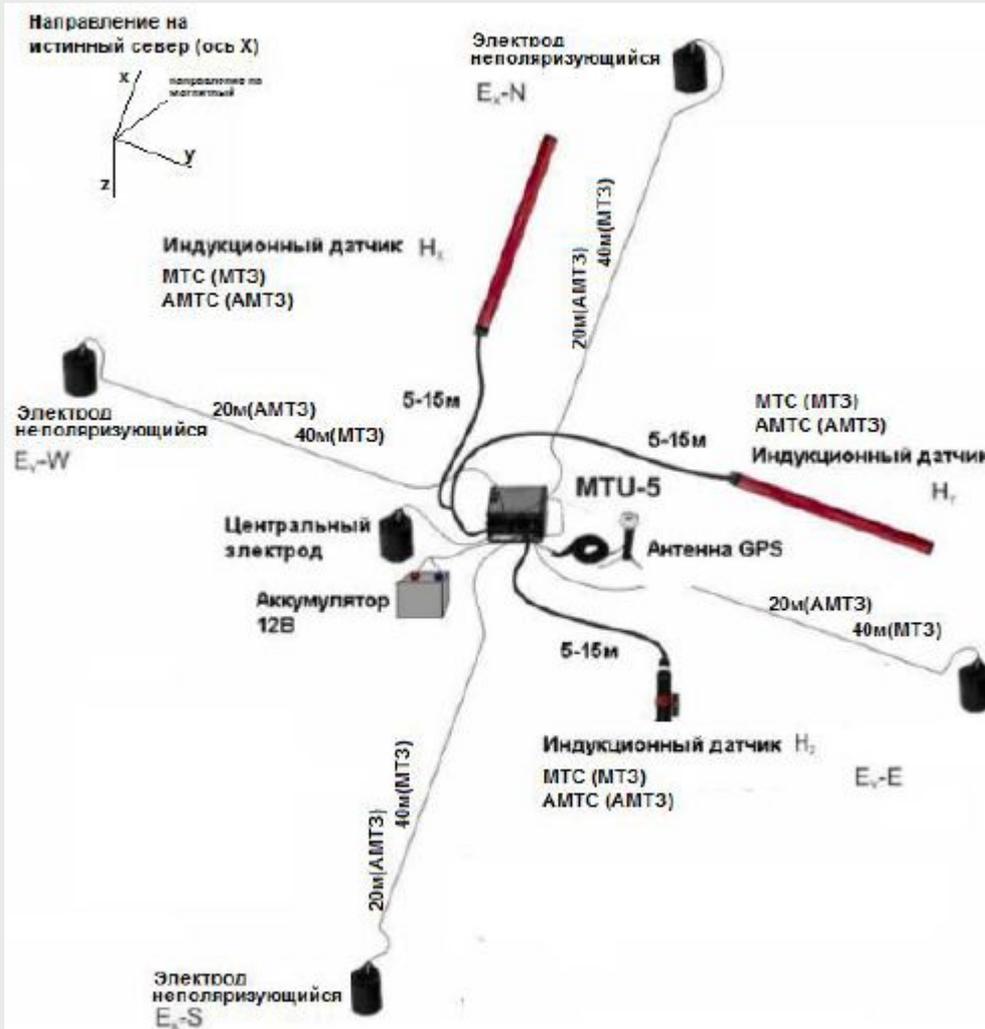


Пример съемок масштаба 25000, 10000, и **5000 (в 1 см - 50 м)**. Высокая точность привязки, но пока слабая обработка (гл. обр. картирование или поиск хорошо проводящих объектов, но **не зондирование**). ЗАО «Геотехнологии».

Магнитотеллурические зондирования

МТЗ используют ЭМ поля естественного происхождения, вызванные "солнечным ветром" - потоком заряженных частиц от Солнца и грозowymi разрядами в атмосфере Земли. Высокочастотные (короткопериодные) колебания проникают на меньшую глубину, а низкочастотные (длиннопериодные) - на большую глубину, от десятков метров до сотен км. МТЗ прошел большой путь развития аппаратуры, чувствительность которой возросла в сотни раз, теории, от скалярного импеданса - отношения двух взаимно перпендикулярных компонент электрического и магнитного поля до тензора (таблицы всех возможных комбинаций E и H компонент), моделей от 1D - горизонтально слоистых сред до 2D и 3D моделей, алгоритмов обработки и инверсии (интерпретации) получаемых данных.

Аппаратура и оборудование МТЗ



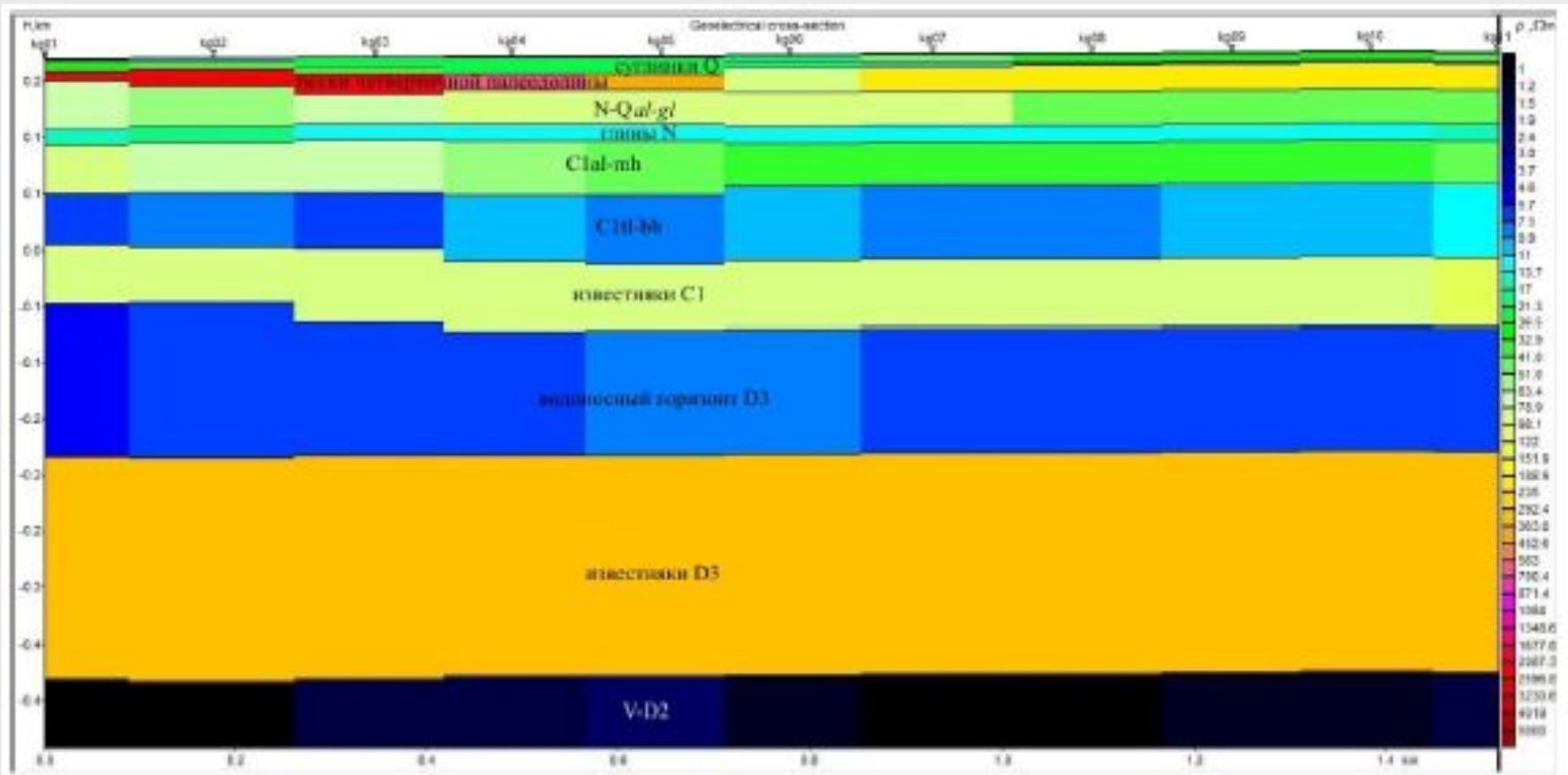
Станция фирмы Феникс (Канада)
Ориентация на север. Координата центра по GPS, время по GPS. Электрические линии MN юг-север и запад-восток с неполяризуемыми электродами, магнитные индукционные датчики для 3 компонент X, Y, Z, чтобы регистрировать 2 компоненты электрического поля E_x , E_y и три компоненты магнитного поля H_x , H_y , H_z . Для изучения глубин до 1 км время регистрации 30 мин. Для больших глубин - до нескольких суток.

Обработка МТЗ

5 компонент поля записаны в память станции от времени. Цель обработки - перейти к кривым кажущегося сопротивления. **На первом этапе** ведется **просмотр** записей и **отбраковка** участков с браком или с сильными помехами. Источники помех электрифицированные железные дороги, близкие грозы, линии ЛЭП, жилые или промышленные районы, сторонние электромагнитные поля. **Второй этап** - перевод записей от временной области в частотную через разложение Фурье. Перевод записей в разрядах АЦП в Е и Н поля в В/м и А/м. **На третьем этапе** из компонент поля определяются импедансы (или передаточные функции). **4 этап** - ручная отбраковка оценок передаточных функций и проведение сплайнов а **в конце обработки получение кривых кажущегося сопротивления и фаз.**

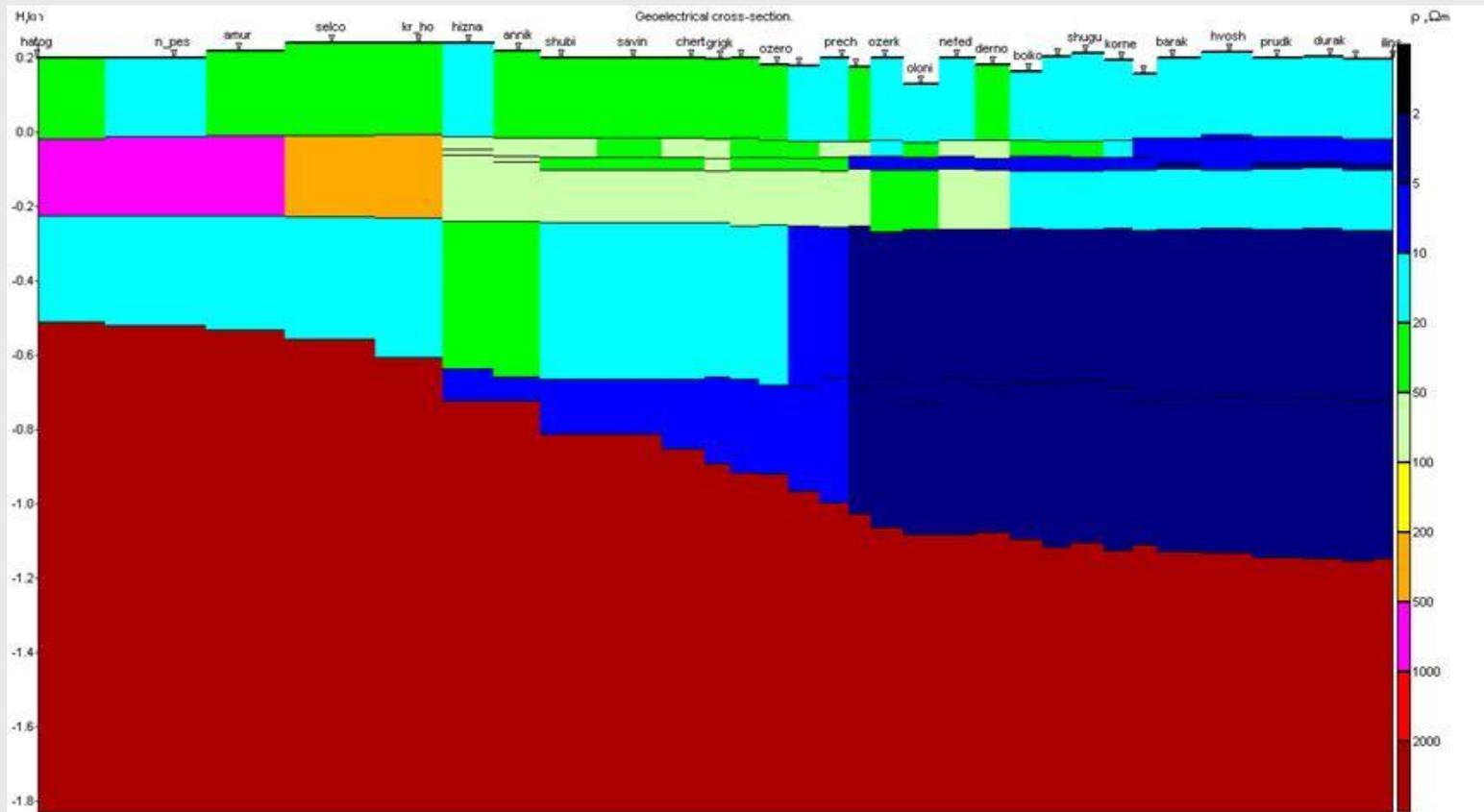
Интерпретация кривых МТЗ делится на качественную и количественную. На этапе качественной интерпретации оценивается слоистая модель среды и к какому случаю ближе полученные данные 1D, 2D или 3D. После этого происходит количественная интерпретация.

Результаты интерпретации МТЗ



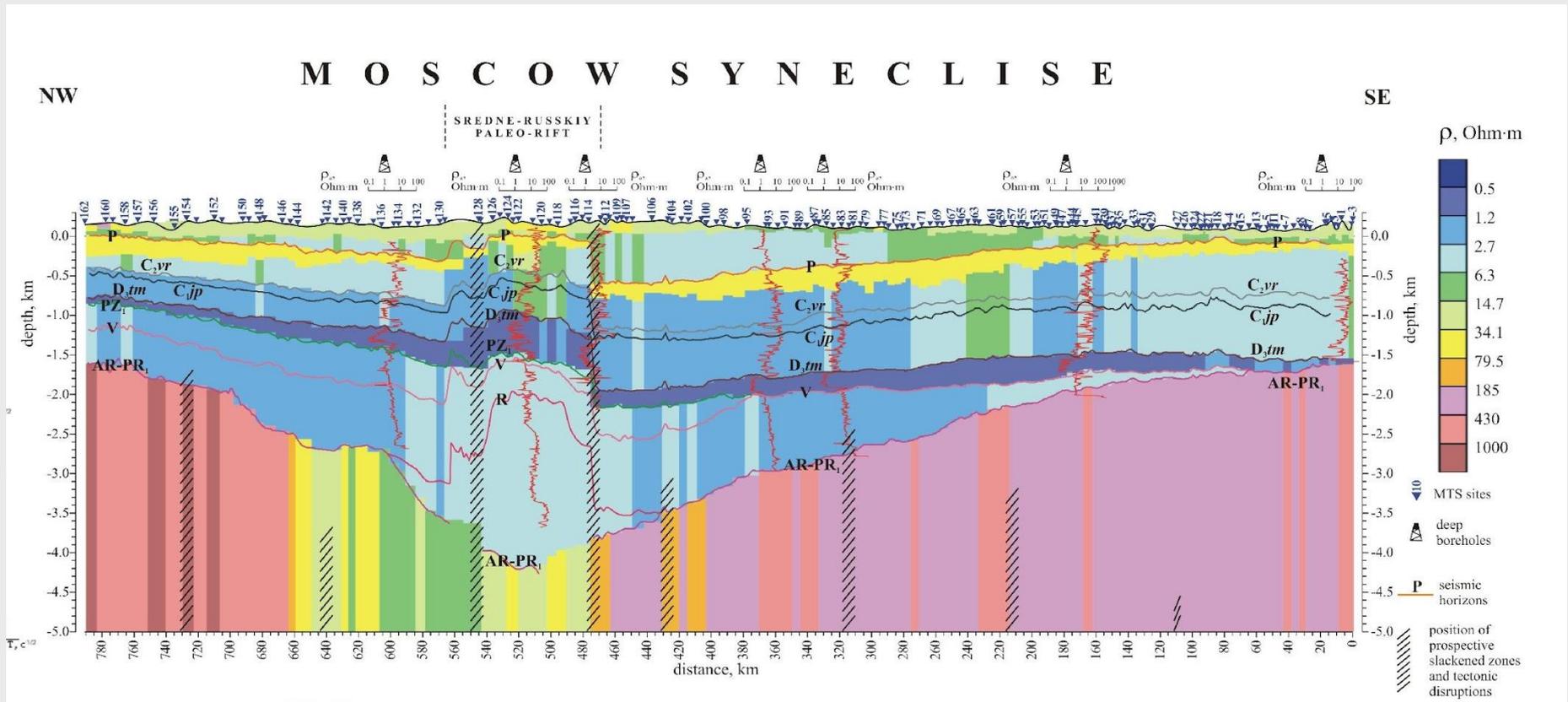
Изучение по глубине около 600 м. Длина профиля 1.5 км. Учебная практика.

Пример 2



Геоэлектрический разрез по данным МТЗ в районе перехода Воронежской антеклизы к Московской синеклизе. Профиль Бетлица (между гг. Рославль и Киров) на Медынь (примерно 170 км) с ЮЗ на СВ. Интервал глубин - 2 км.

Пример программы «Рифей» (Московская синеклиза)

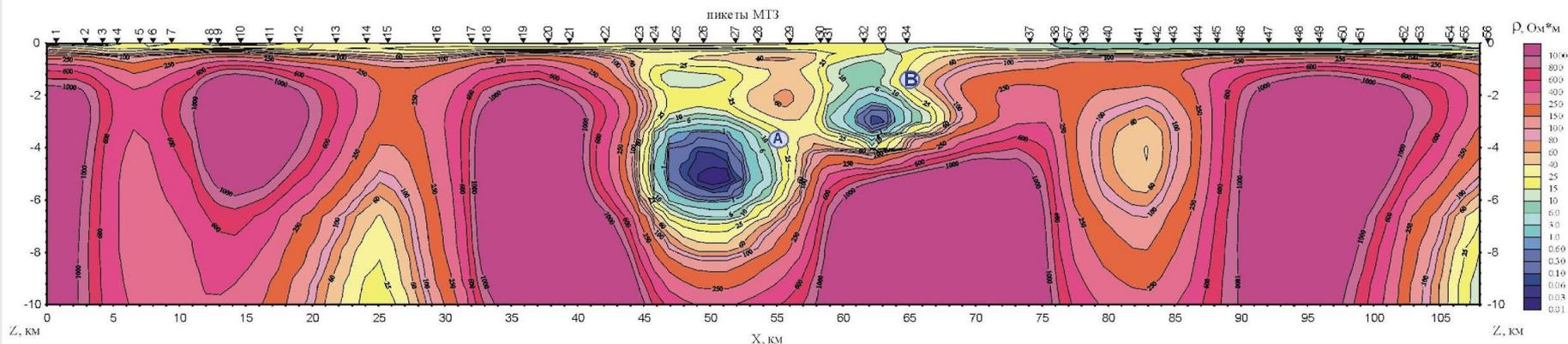
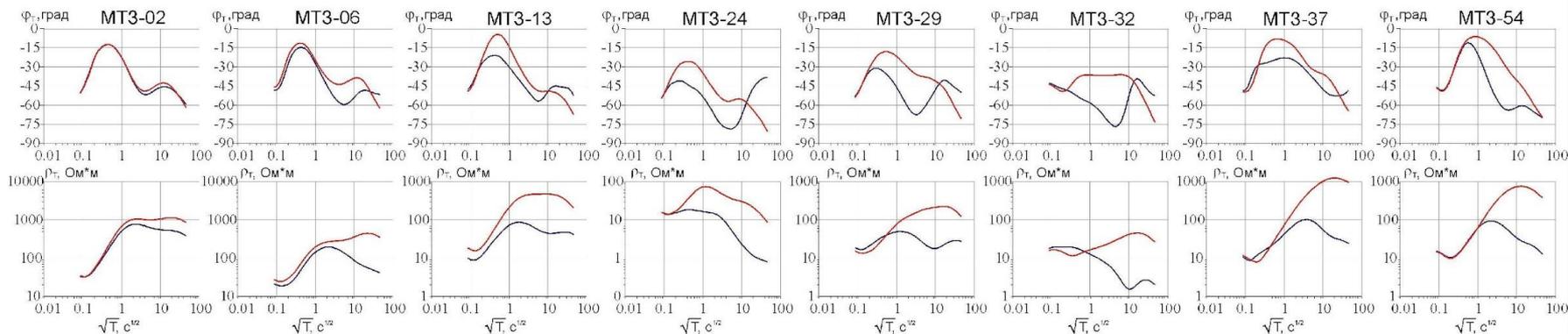


Профиль по длине 750 км, по глубине 5 км

Воронежский кристаллический массив

Геоэлектрический разрез, полученный в результате двумерной интерпретации данных МТЗ по профилю, пересекающему Воронежский кристаллический массив.

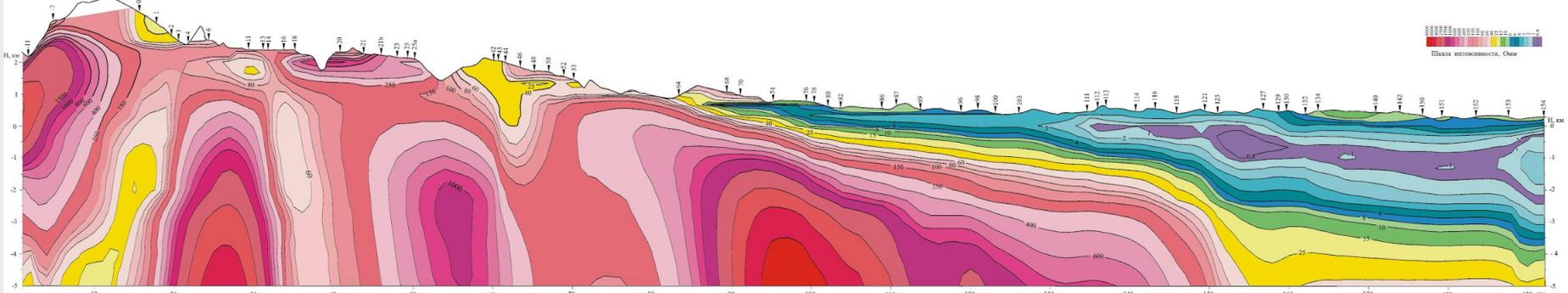
— продольные кривые (E) \parallel
— поперечные кривые (H) \perp



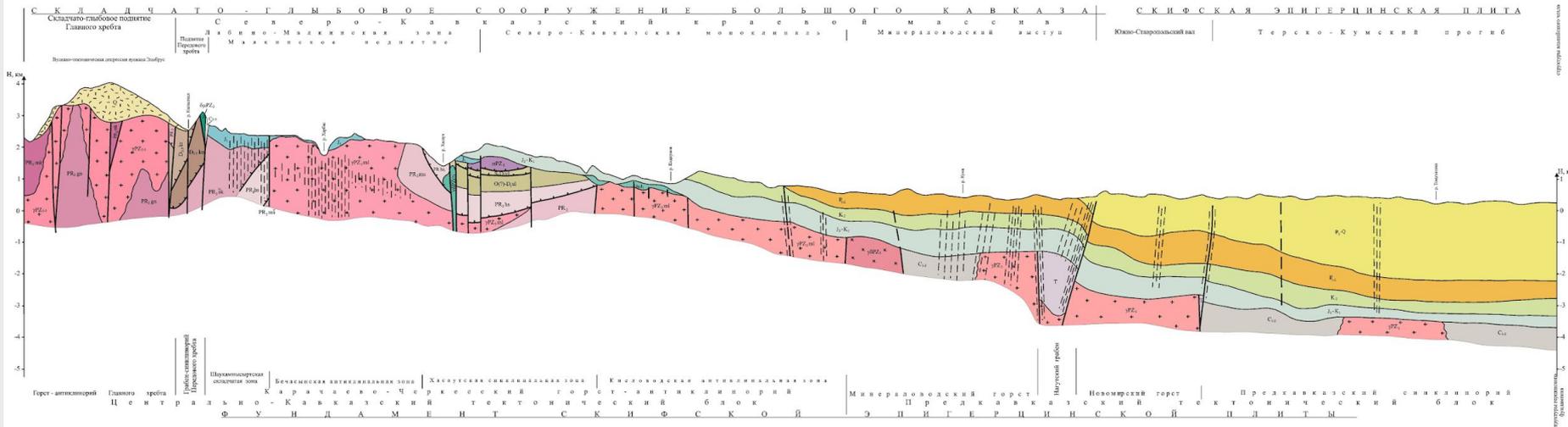
100 км по горизонтали, 10 км по глубине

Приэльбрусский профиль

Геоэлектрический разрез верхней части разреза по данным МТЗ



Геологический разрез



190 км по горизонтали, 7 км по глубине

Профиль 2-ДВ (Магаданская область)



Профиль 2-ДВ (Магаданская область)

60 км по глубине, 500 км по профилю, фрагмент - 220 км.

