

Группы электроразведочных методов

- Применение э/р методов при поисках и разведке МПИ, при проведении гидрогеологических, археологических, геоэкологических исследованиях и др. основано на изучении постоянных и переменных природных и искусственных электрических и электромагнитных полей. Используется различия в электрических свойствах пород и минералов.
- **Выделяются следующие группы методов:**
 1. **Методы сопротивлений**, основанные на изучении различий в сопротивлениях (или проводимости) пород, с использованием электрических токов, проходящих от заземленных искусственных источников.
 2. **Электромагнитные методы.**
 - Методы низкочастотного электромагнитного поля – решают те же задачи, что и методы сопротивлений, но система наблюдений – беспроводная. Используется в аэро-вариантах.
 - Георадар – фиксирует радиоволны - тип электромагнитных волн, отраженных от геологических поверхностей и дает более ясный образ изучаемой среды, сходный с сейсморазведочным. Малая глубинность – основная сфера применения инженерная геология.

Группы электроразведочных методов (продолжение)

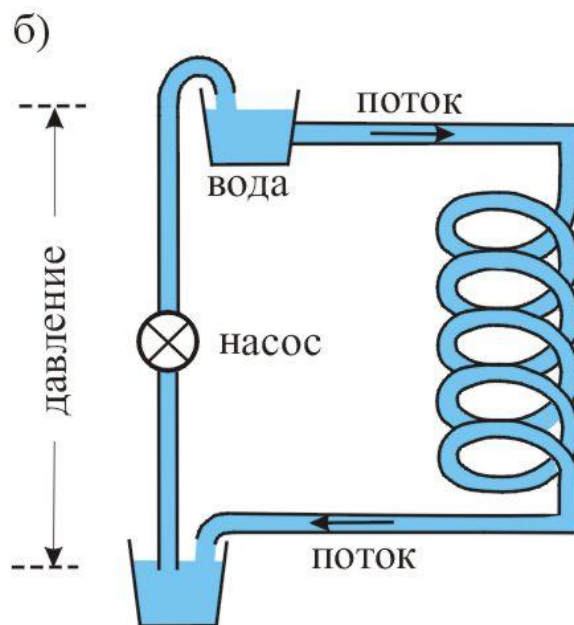
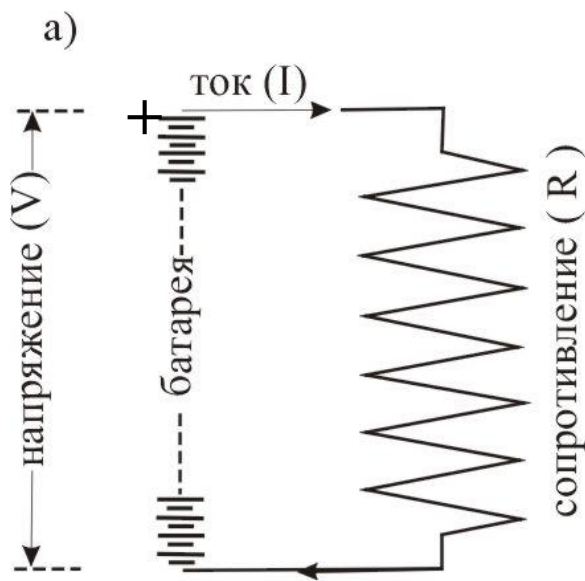
- Магнитотеллурические (МТ) методы используют естественные токи в Земле, опираясь на комбинирование электромагнитного метода и метода сопротивлений. Наиболее глубокий метод электроразведки – десятки - сотни км.

- **3. Методы изучения полей физико-химического происхождения.**

- Метод естественного поля (ЕП) – используется для разведки массивных руд и опирается на изучение естественных электрических токов.

1. Методы сопротивлений

- Метод опирается на изучение глубинных недр посредством пропускания тока через заземленные электроды.
- **Теоретические основы метода:** Породы состоят из атомов, вкл-х положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны, число которых равно. Электрические заряды движутся в контуре подобно циркуляции воды по трубам. Движение зарядов – электрический ток происходит благодаря движению электронов (хотя в построениях принимается, что ток движется от (+) к (-)).



Теоретические основы метода

- I - электрический ток (ампер)
- V – разность потенциалов (вольт)
- R – сопротивление.

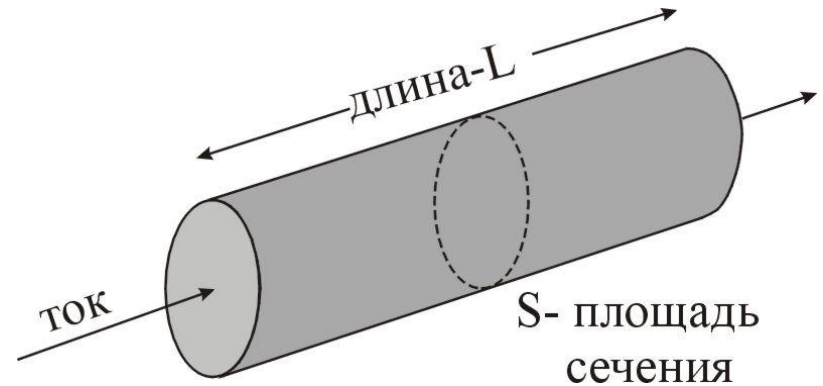
$$R = \frac{V}{I} \quad \text{закон Ома}$$

- R зависит от материала и от формы проводника:
 - состав провода: $R_{\text{Cu}} < R_{\text{Zn}}$ того же- размера;
 - размер провода: $R_{\text{длинный}} > R_{\text{короткий}}$ при увеличении длины провода в 2 раза R увеличивается в 2 раза;
 - сечение провода: при увеличении сечения провода в 2 раза R уменьшается в 2 раза;

Эти закономерности выражаются:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L}$$

ρ - удельное электрическое сопротивление (Ом*м) – характеризует материал вне зависимости от формы

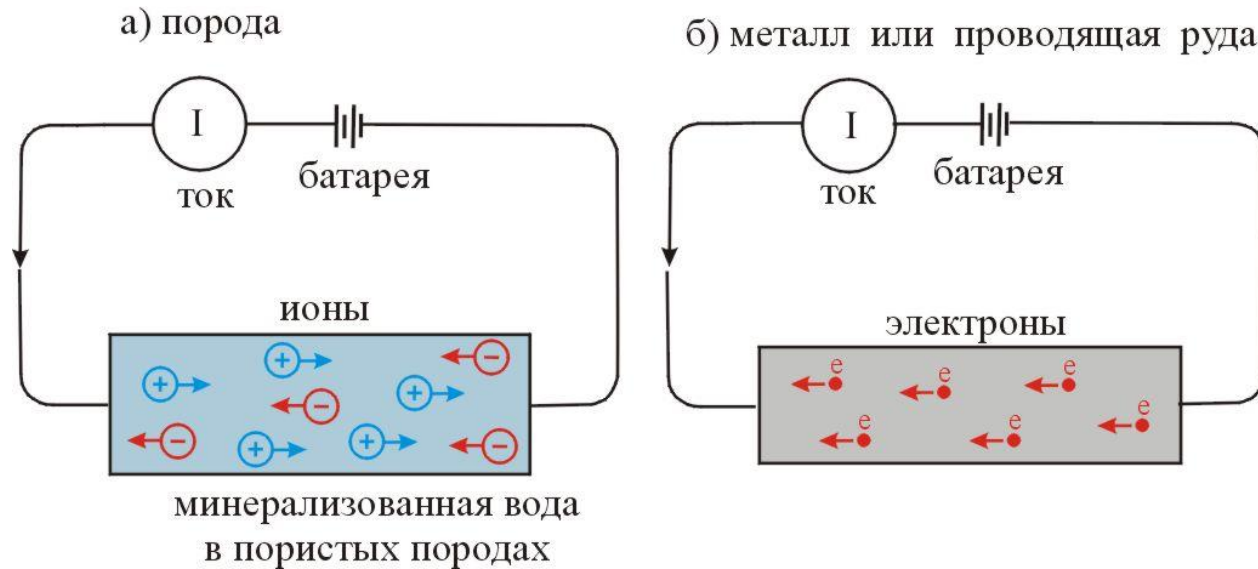


- $\sigma = 1/\rho$ – величина обратная удельному электрическому сопротивлению – электропроводность

Удельное электрическое сопротивление некоторых пород и минералов

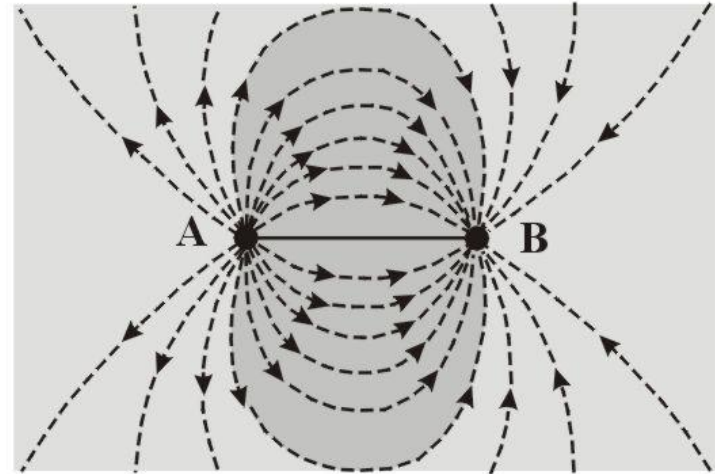
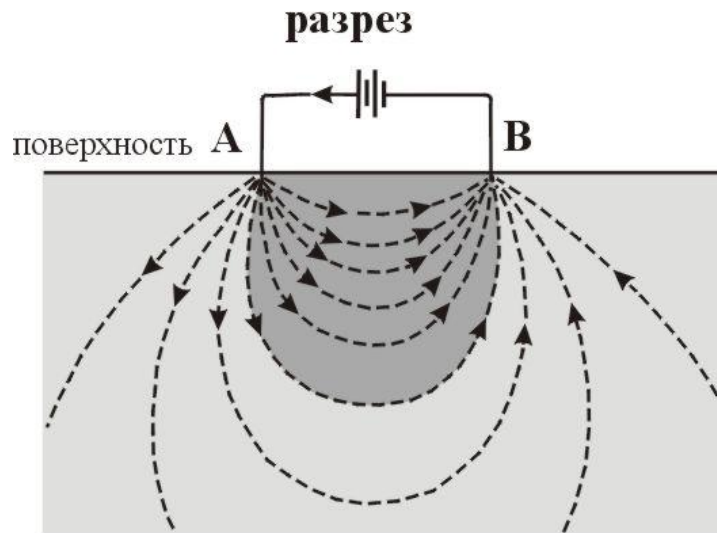
Породы, минералы, руды	ρ (Ом*м)
Осадки	
глины	1-100
известняк	$50-10^7$
песчаник	$1-10^8$
Вулканические и метаморфические породы	
базальт	$10-10^7$
гнейс	$1000-10^6$
Минералы и руды	
графит	$10^{-4}-10^{-3}$
пирит	1-100
кварц	
Вода, эффект обводненности и содержания солей	
природные воды не минерализованные	$1-10^3$
засолоненные природные воды (20%)	$5*10^{-2}$
гранит (0% воды)	10^{10}
гранит (0.19% воды)	$1*10^6$
гранит (0.31% воды)	$4*10^3$

Отличия в проводимости пород и металлов



- Соли, растворенные в подземных водах, распадаются на положительно- и отрицательно заряженные ионы. Например, поваренная соль распадается на ионы Na^+ и Cl^- , которые перемещаются в воде в противоположных направлениях, создавая электрический ток.
- Электрический ток в металлах (и рудах) обусловлен движением электронов.

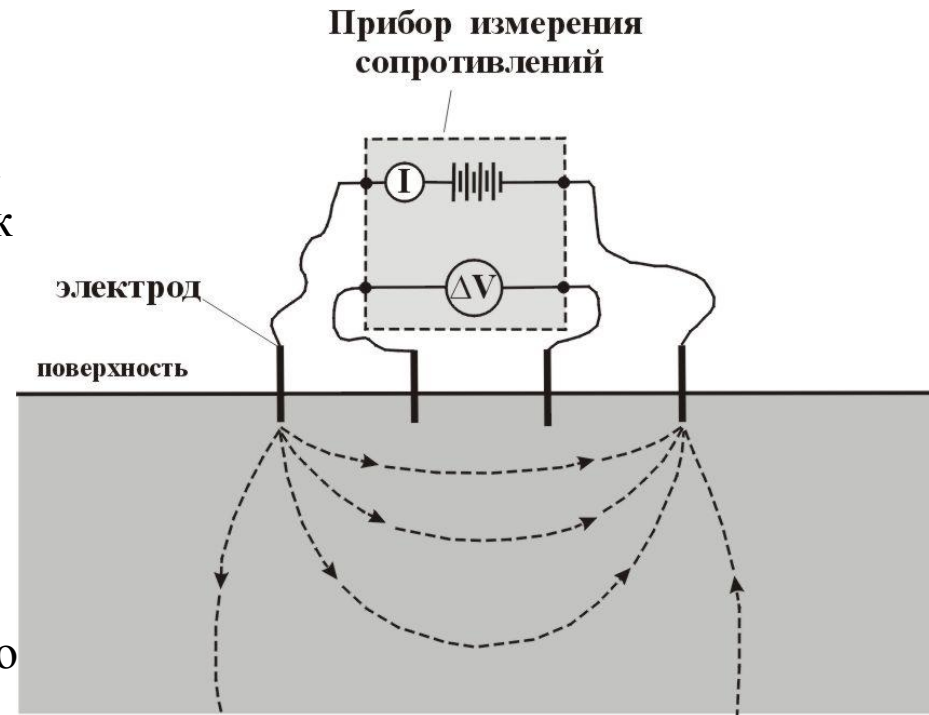
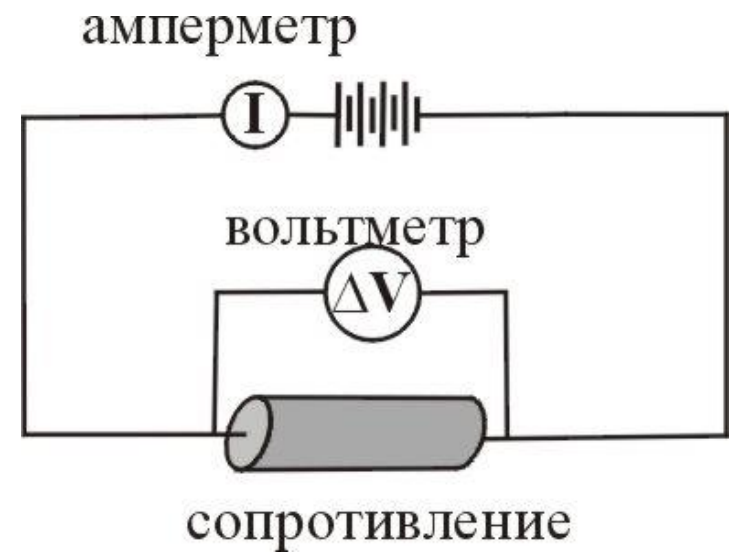
Характер прохождения электрического тока в геологической среде



- Источник электрического тока подключается к геологической среде с помощью питающих электродов (**А** и **В**) – металлических стержней, воткнутых в почву на несколько см.
- Заряды распространяются во все стороны т.к. природа использует наиболее экономные пути прохождения зарядов (увеличение сечения – уменьшение уд. эл. сопротивления). В однородной среде не более 30% зарядов проникает на глубины большее, чем расстояние **АВ**.

Система наблюдений

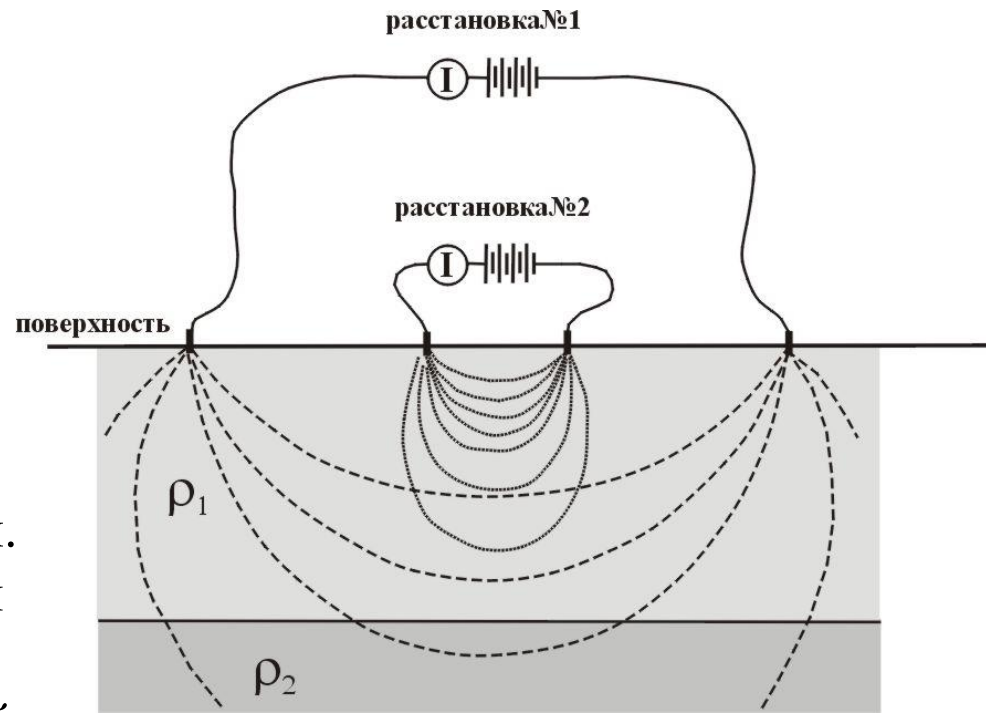
- В электротехнике разность потенциалов измеряется на краях сопротивления в единой цепи.
- В электроразведке эта схема не пройдет, т.к. существует большое неизвестное сопротивление между электродом и почвой. Вместо попыток изучения этого контактного сопротивления для измерения V используется другая измерительная цепь со своими электродами. Последние также имеют контактное сопротивление, но это неважно, т.к. вольтметр сконструирован т.о. чтобы пропускать пренебрежимо малый ток (I). Отсюда по закону Ома ΔV контактное – пренебрежимо мало.
- -Источники тока- батареи или генераторы.
- Амперметр и вольтметр монтируются в один прибор, в котором чаще выводятся значения $\Delta V/I$, чем по отдельности I и ΔV .
- Обычно: питающая цепь – I - мА, V – около 100 В; приемная цепь – Вольты –мВ.



Вертикальное электрическое зондирование

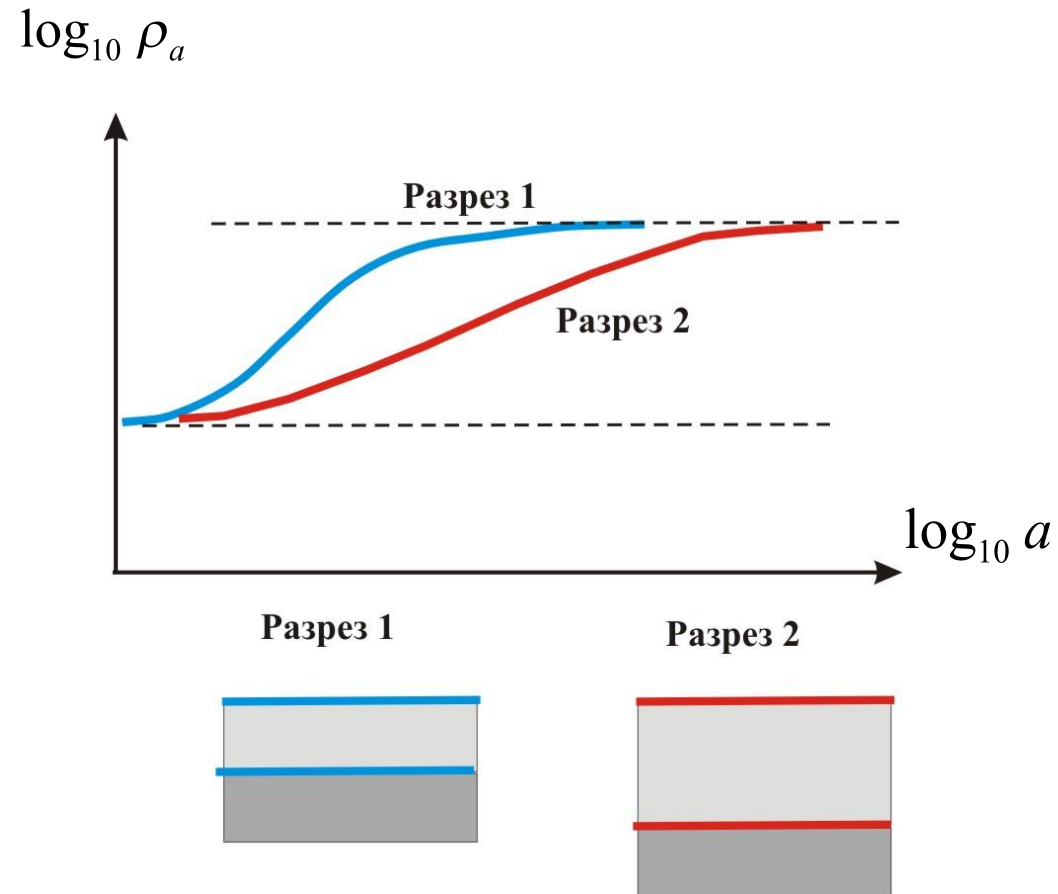
(ВЭЗ) – «геофизическая скважина».

- ВЭЗ используется при изучении мощностей и сопротивлений слоев горизонтально-расслоенной среды.
- Методика – расстояние между электродами увеличивается относительно фиксированного центра.
- Расстановка №2 – расстояние между питающими электродами много меньше чем мощность верхнего слоя. В слой 2 проникает очень небольшая часть тока: главное влияние на прохождение тока оказывает верхний слой.
- Расстановка №1 – значительное влияние на прохождение тока оказывает слой 2.

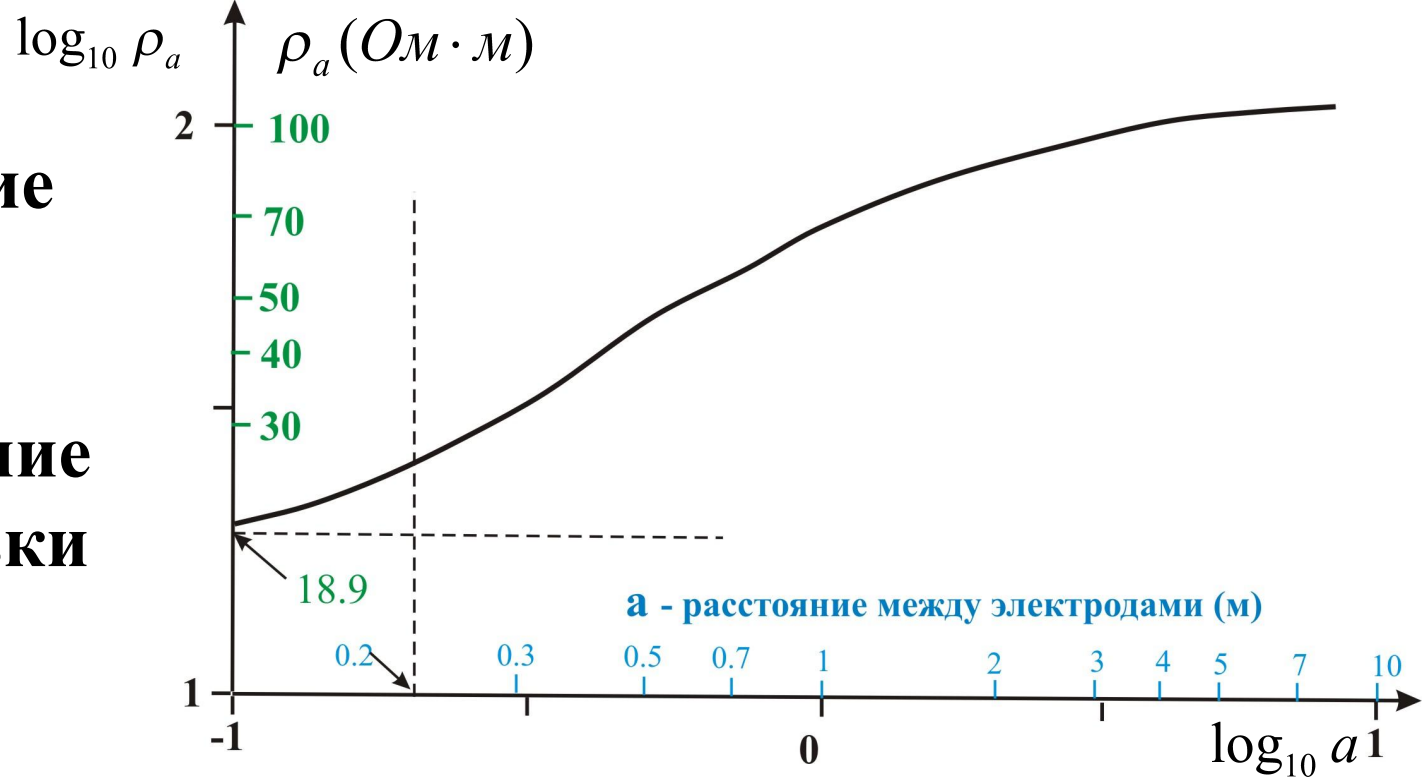


Моделирование двухслойной среды

- Теоретические кривые двухслойных разрезов с одинаковыми сопротивлениями, но разной мощностью верхнего слоя имеют различные формы.



Выполнение ВЭЗ с использованием расстановки Виннера

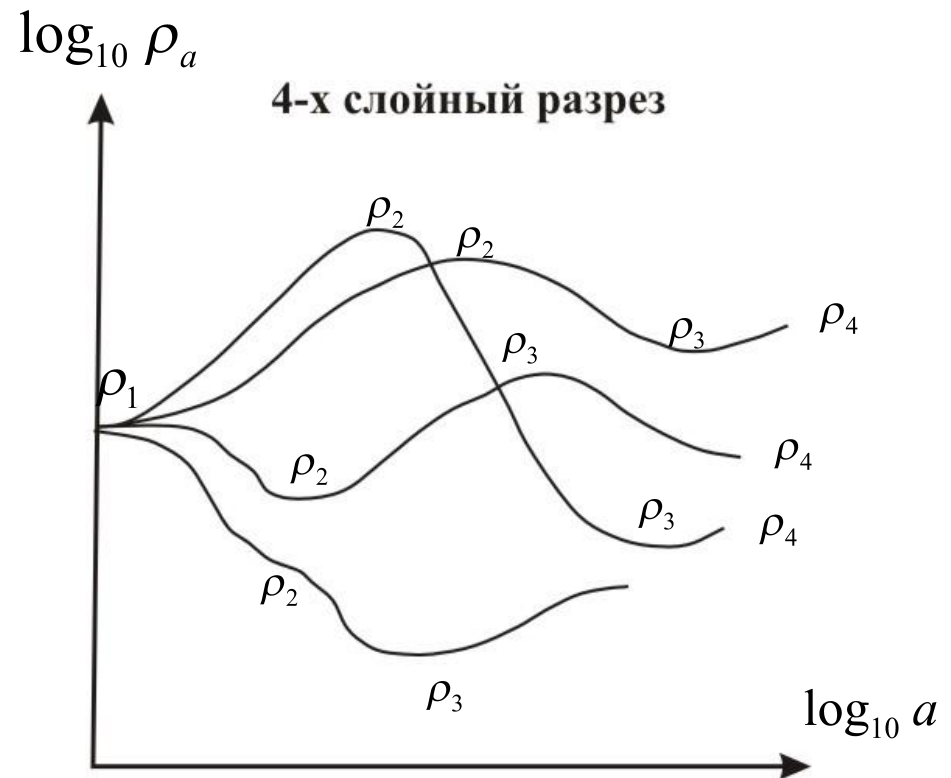
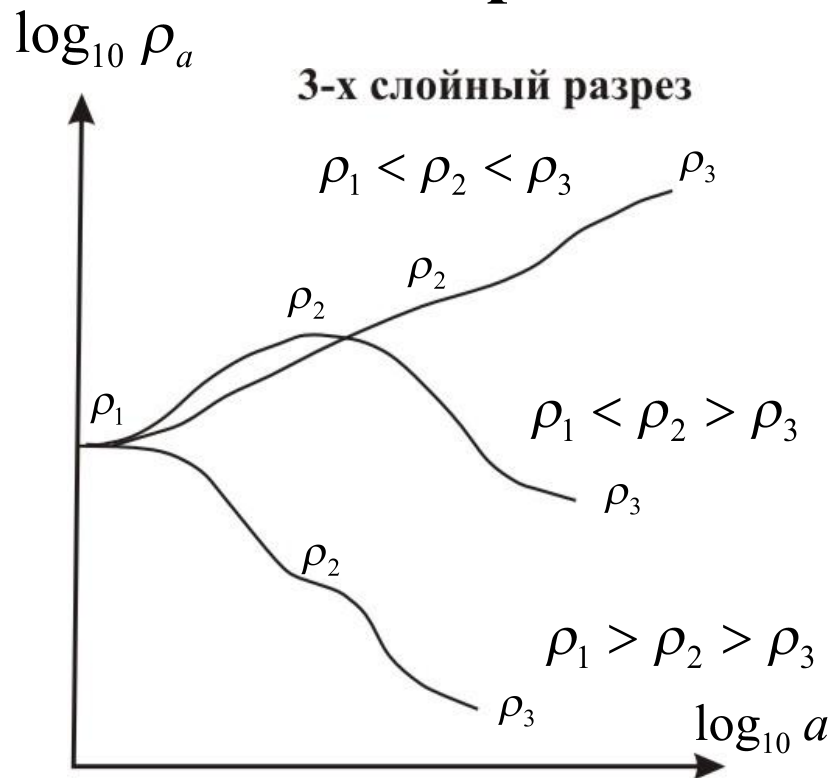


- Четыре электрода втыкаются в Землю на одинаковом расстоянии друг от друга (a).
- «a» прогрессивно изменяем: 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0.
- Снимаются значения ΔV и I , рассчитываются кажущиеся сопротивления:

$$\rho_a = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

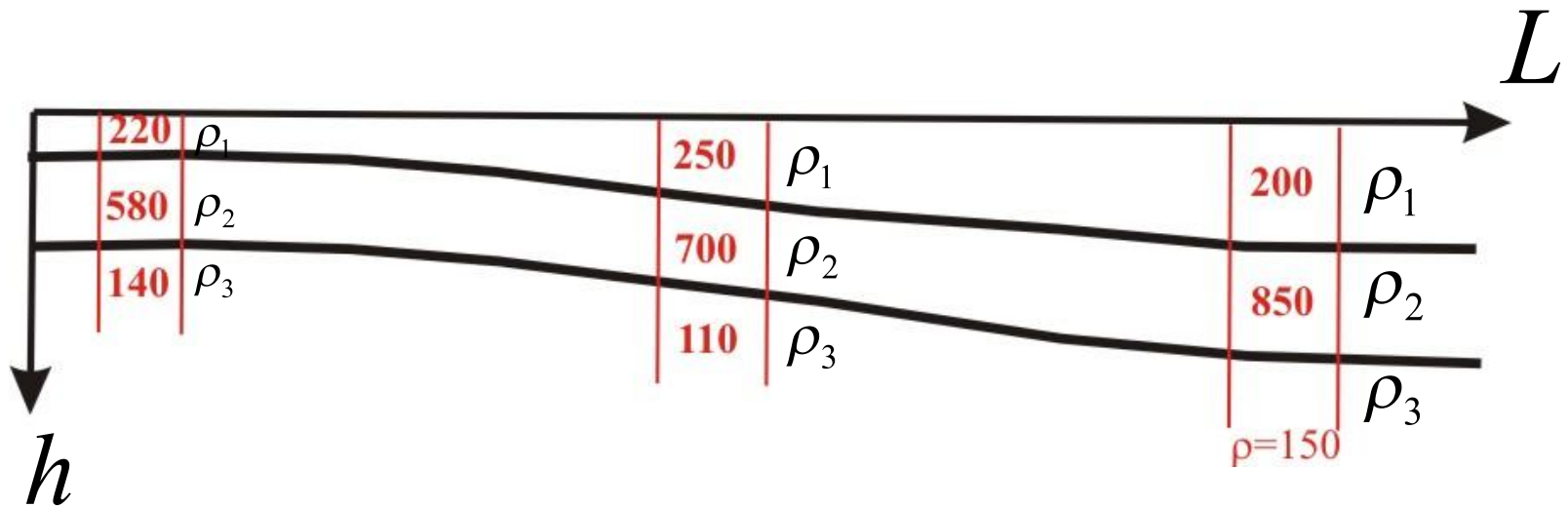
- Строится график зависимости кажущегося сопротивления от расстояния между электродами в логарифмической шкале.

Разрез многослойной модели



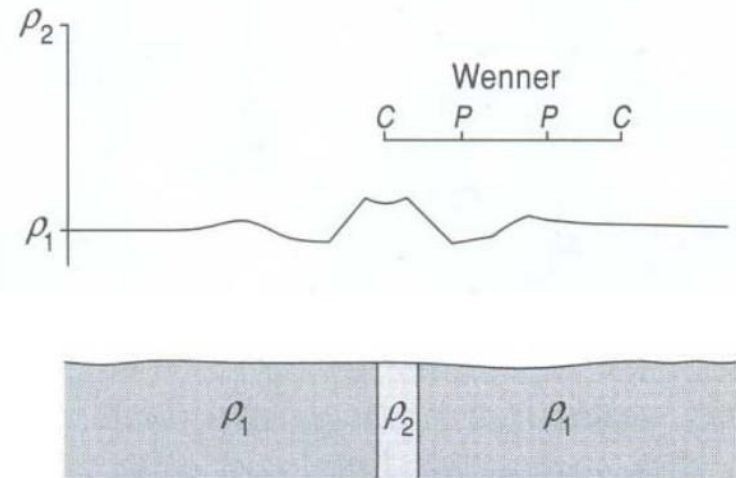
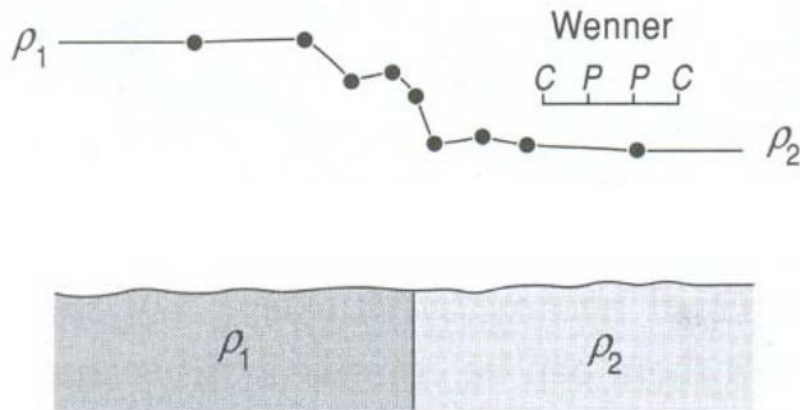
- Если в разрезе выделяется более 2-х слоев, кривые не достигают ассимптотических значений даже при больших расстановках, т.к. сказывается влияние нижележащего слоя.
- Анализируя кривые вы можете оценить к-во слоев: каждое изменение от вогнутой к выпуклой форме отмечает присутствие слоя.
- Многослойные модели обрабатываются с использованием компьютерных программ: подбор поля модели и сопоставление с наблюдаемой кривой.

Ограничения в использовании ВЭЗ



- Количество выделяемых слоев зависит от:
 - расстояние между электродами (a),
 - различий в сопротивлении слоев.
- Глубинность моделирования:
 - в практике $\frac{1}{2} \cdot a$ - максимальной глубине моделирования,
 - глубина может быть ограничена из-за того, что DV становится слишком маленьким (геометрический фактор, влияние слоев с низкими сопротивлениями).
 - для выделения слоя на глубине важна не его мощность, а соотношение мощности и глубины залегания.
- Если поставить серию ВЭЗ (электрических скважин) можно проследить слои в латеральном измерении.

Электропрофилирование



- Электропрофилирование изучает латеральные изменения удельных электрических сопротивлений. Все электроды перемещаются вдоль профиля с фиксированным расстоянием. При покрытии площади параллельными сечениями составляются карты сопротивлений.
- Задача а: граница двух тел. На всех расстановках вдали от контакта $\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{ист}}$.
- Задача б: вертикальная пластина (рудное тело). На обеих расстановках вдали от контакта $\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{ист}}$.

**Геоэлектрическая
томография
(ГЭТ)**

или

**Электрическая
томография
(ЭТ)**

Электротомография (ЭТ) появилась в мире в 1995 г, но вызревала по разным признакам несколько десятилетий. Edwards L.S. 1977. Griffiths D.H. and Turnbull J. 1985.

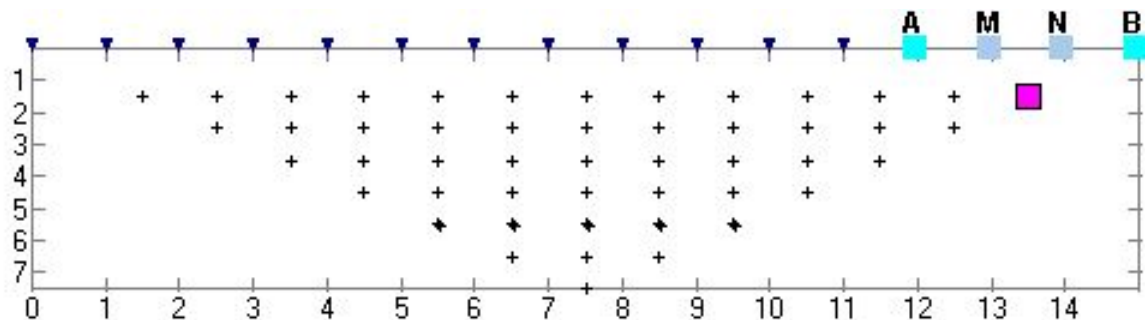
Сейчас это самая употребительная технология в электроразведке, продвинувшая возможности электрических зондирований на постоянном токе очень далеко вперед.

Необыкновенно удобной является программа 2D инверсии **Res2DInv** (М.Локе, Малайзия).

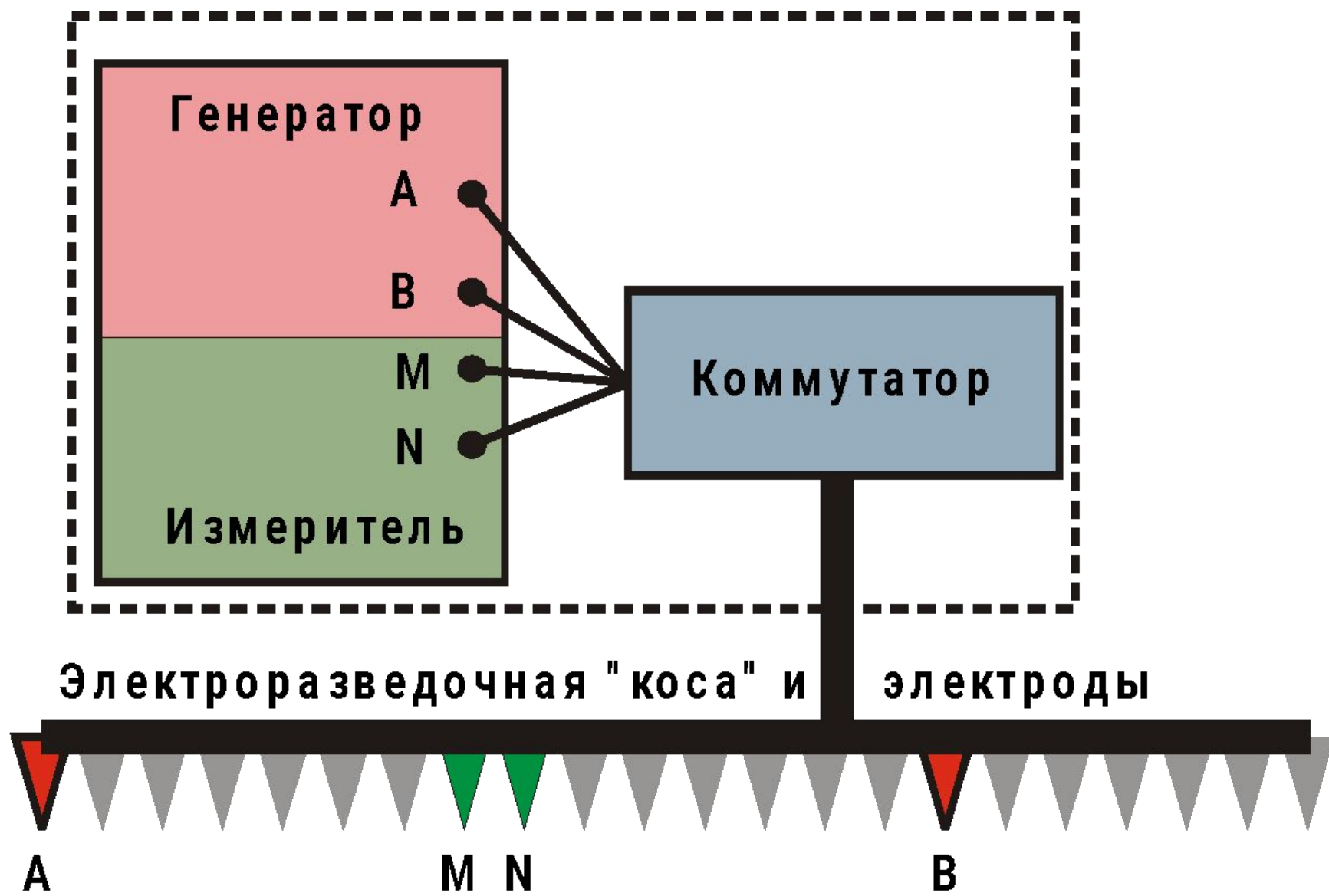


Идея электротомографии

Суть электротомографии - многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдений положения электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом ВЭЗ. Такой подход позволяет использовать преимущества современной аппаратуры. Интерпретацию данных электротомографии проводят в рамках двумерных (трехмерных) моделей.



Многоэлектродная сейсмотомографическая расстановка



Отечественные многоэлектродные станции

«Иднакар», Ижевский физико-технический институт

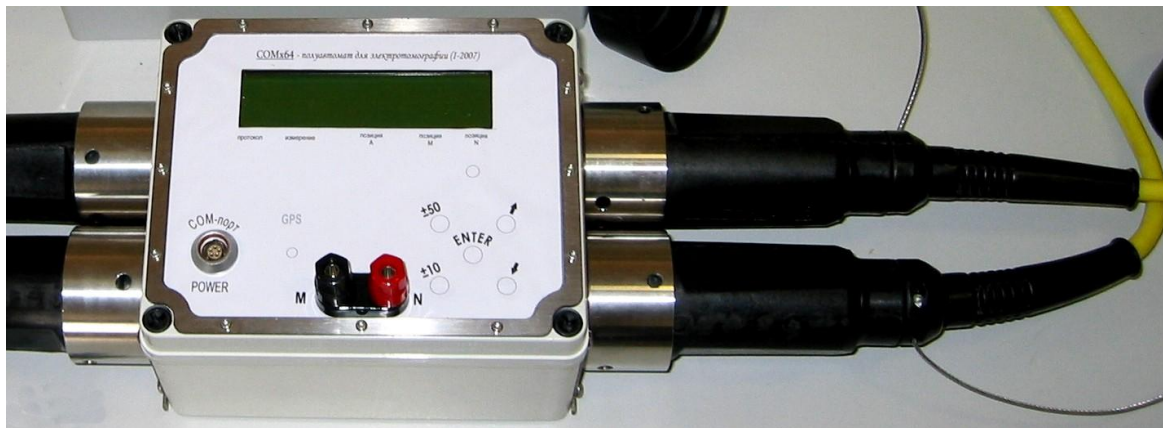


«Омега-48», Логис, Москва



«Скала-48», Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Новосибирск

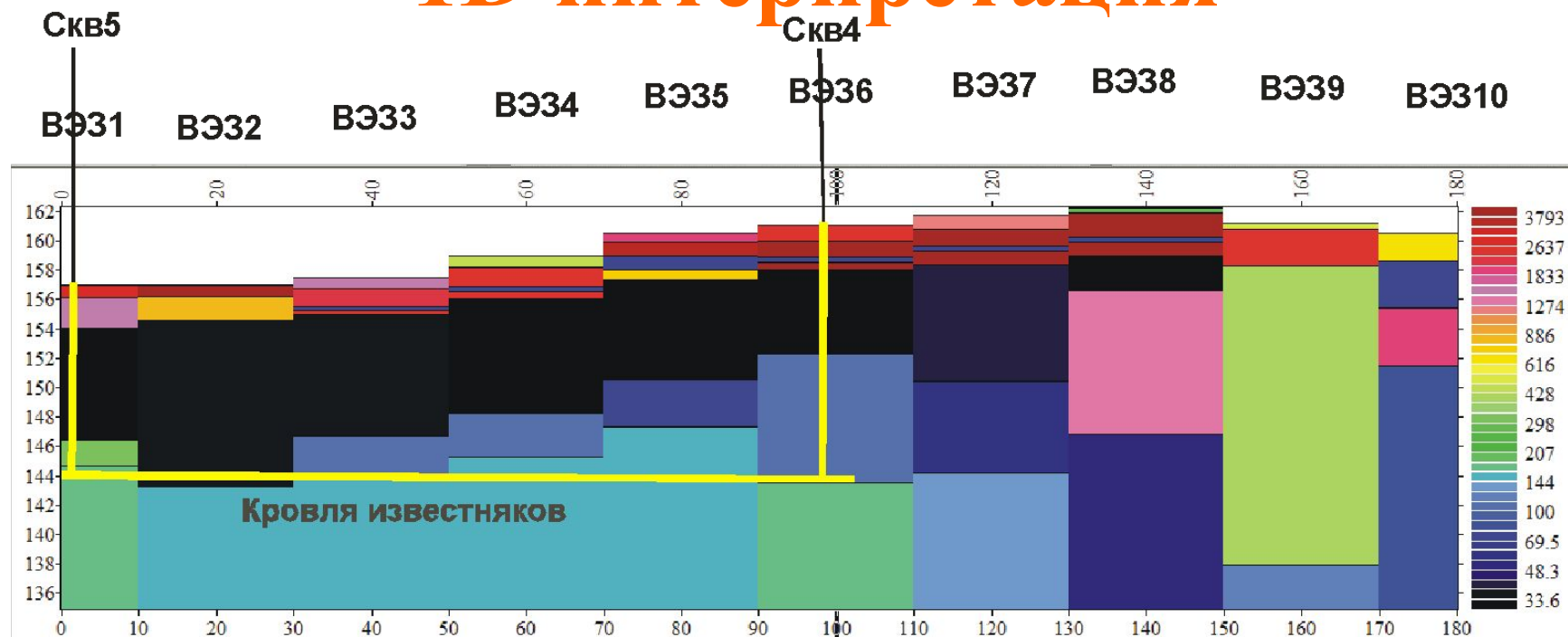
Коммутатор



Коса с токовыводом
Один из приемных
электродов
"Бесконечность"
Генератор
Питающий электрод

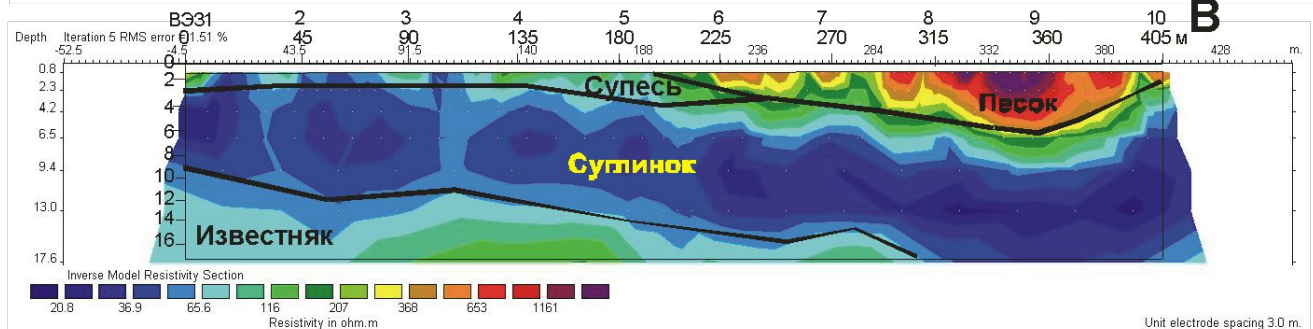
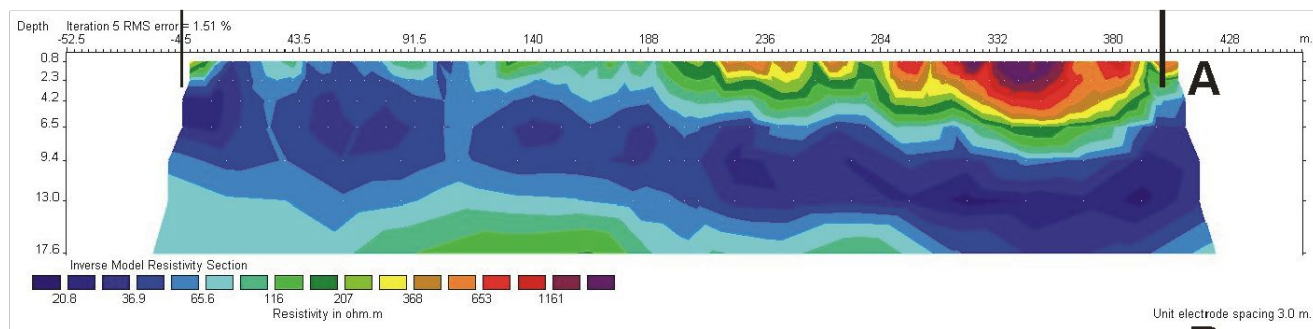
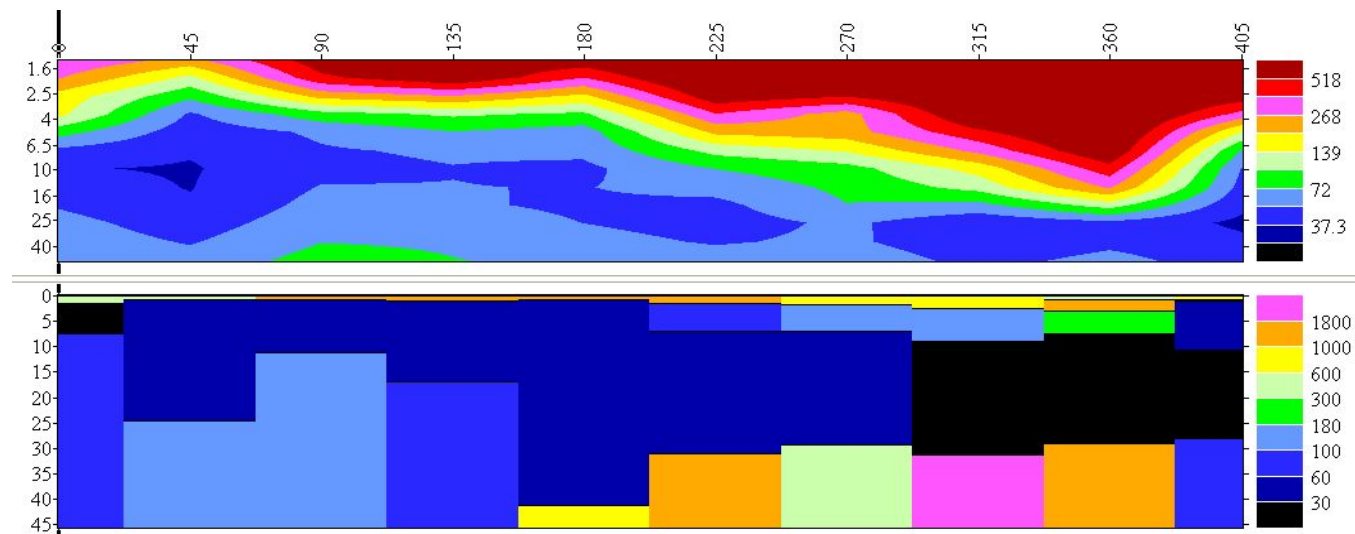


1D интерпретация

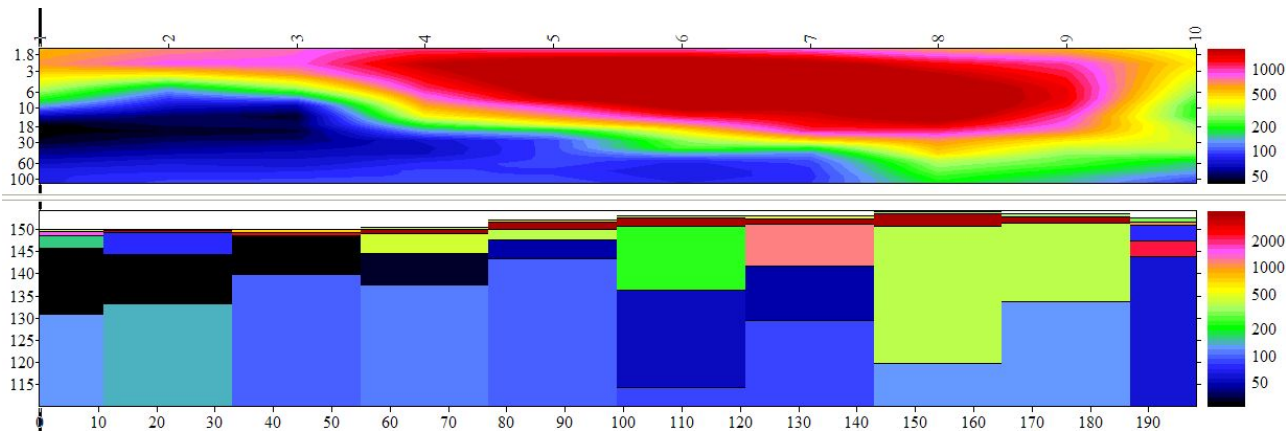


С учетом структуры от 2D инверсии и 2 скважин удалось проинтерпретировать профиль ВЭЗ и получить приемлемый геоэлектрический разрез.

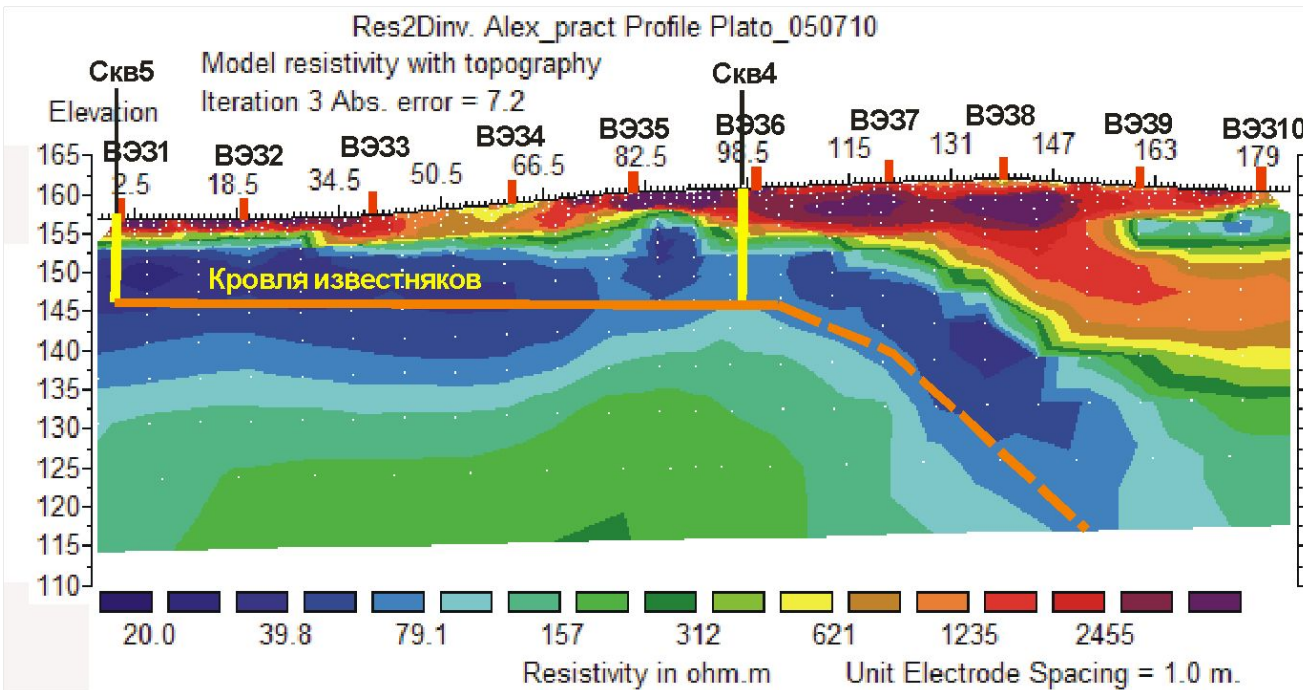
Сопоставление 1D и 2D инверсии



1D и 2D интерпретация

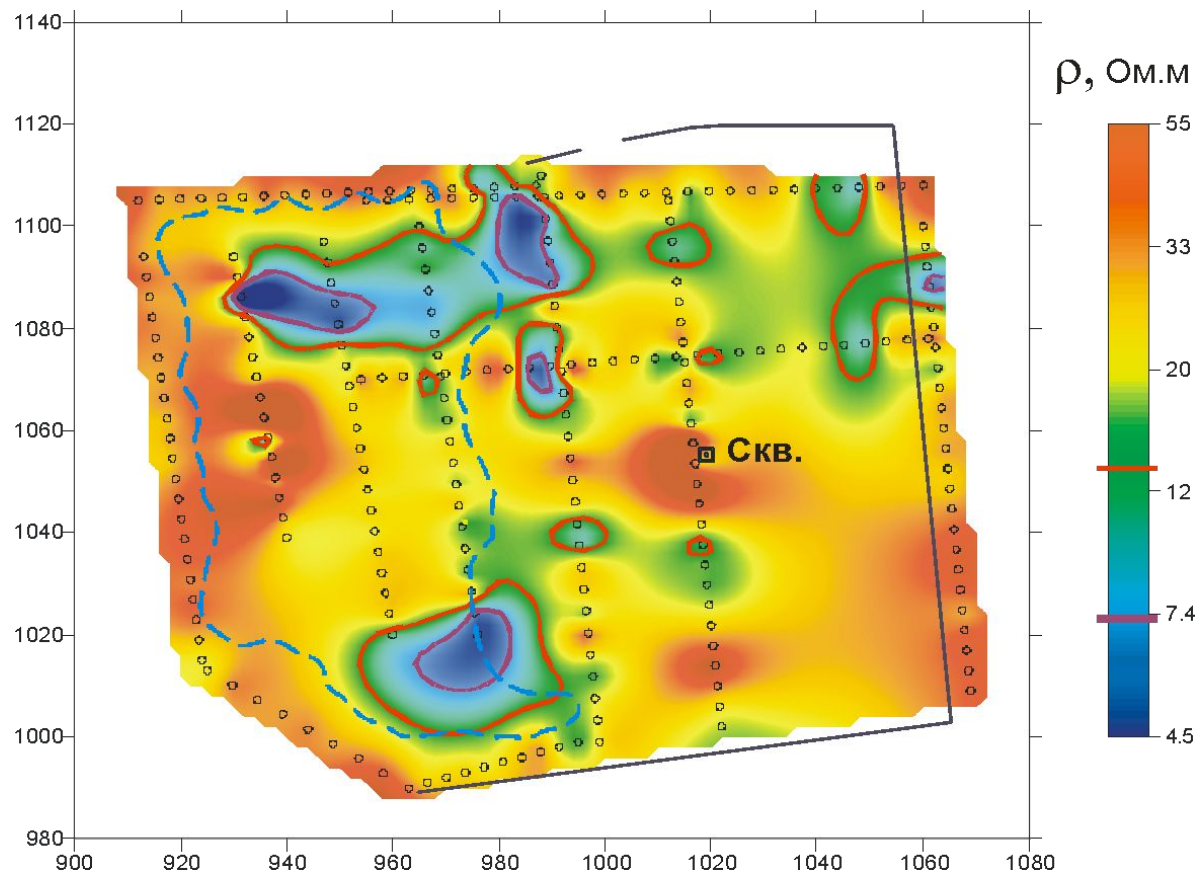


Красивый псевдоразрез ρ_k , но невнятный геоэлектрический разрез, структура его пока непонятна



2D инверсия дает много более "читабельный" разрез, хотя со своими "глюками - сильной макроанизотропией. Из 5 скважин которые должны были зацепить известняк, его достали только 2. Инверсия ясно говорит почему.

Карта-срез изолиний УЭС на глубине 20м

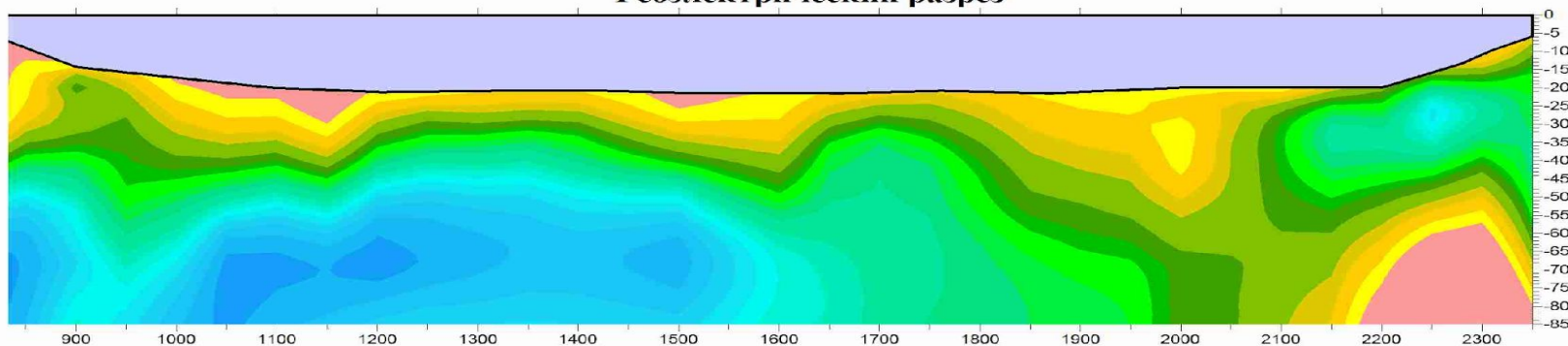


Сравнение «классического» метода ВЭЗ и электротомографии с финансовой точки зрения

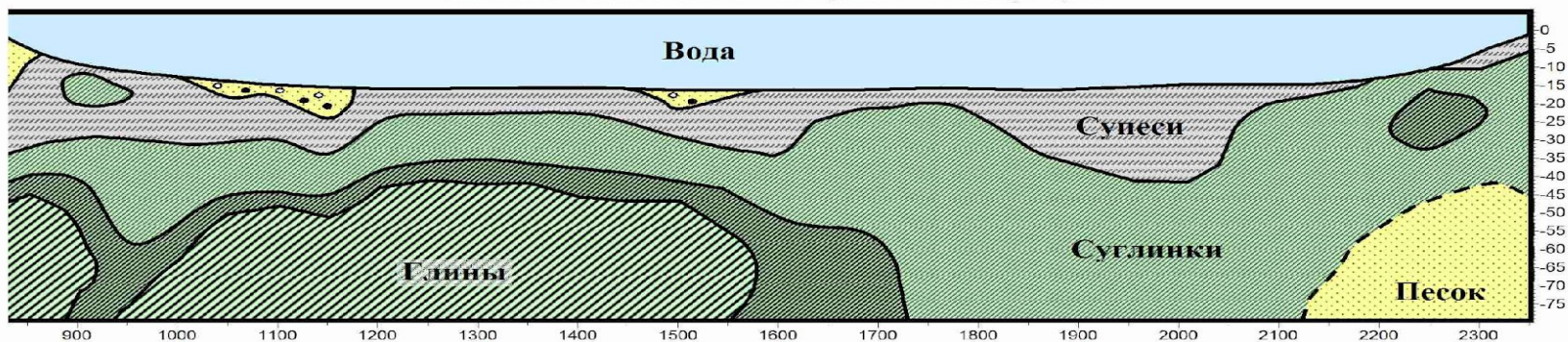
	Метод ВЭЗ	Электротомография
Аппаратура и оборудование	400 тыс. рублей	1 000 - 3 000 тыс. рублей
Число зондирований в день	15 -30	100 - 200
Производительность	2-3 км в день (шаг по профилю 100 м)	0.5 - 1 км в день (шаг по профилю 5 м)
Сметная стоимость 1 км	30-50 тыс. рублей	200 тыс. рублей
Число измерений на 1 км	200-300	3000 - 7000
Стоимость одного измерения	300 рублей	40 рублей



Геоэлектрический разрез



Схематический геолого-геофизический разрез



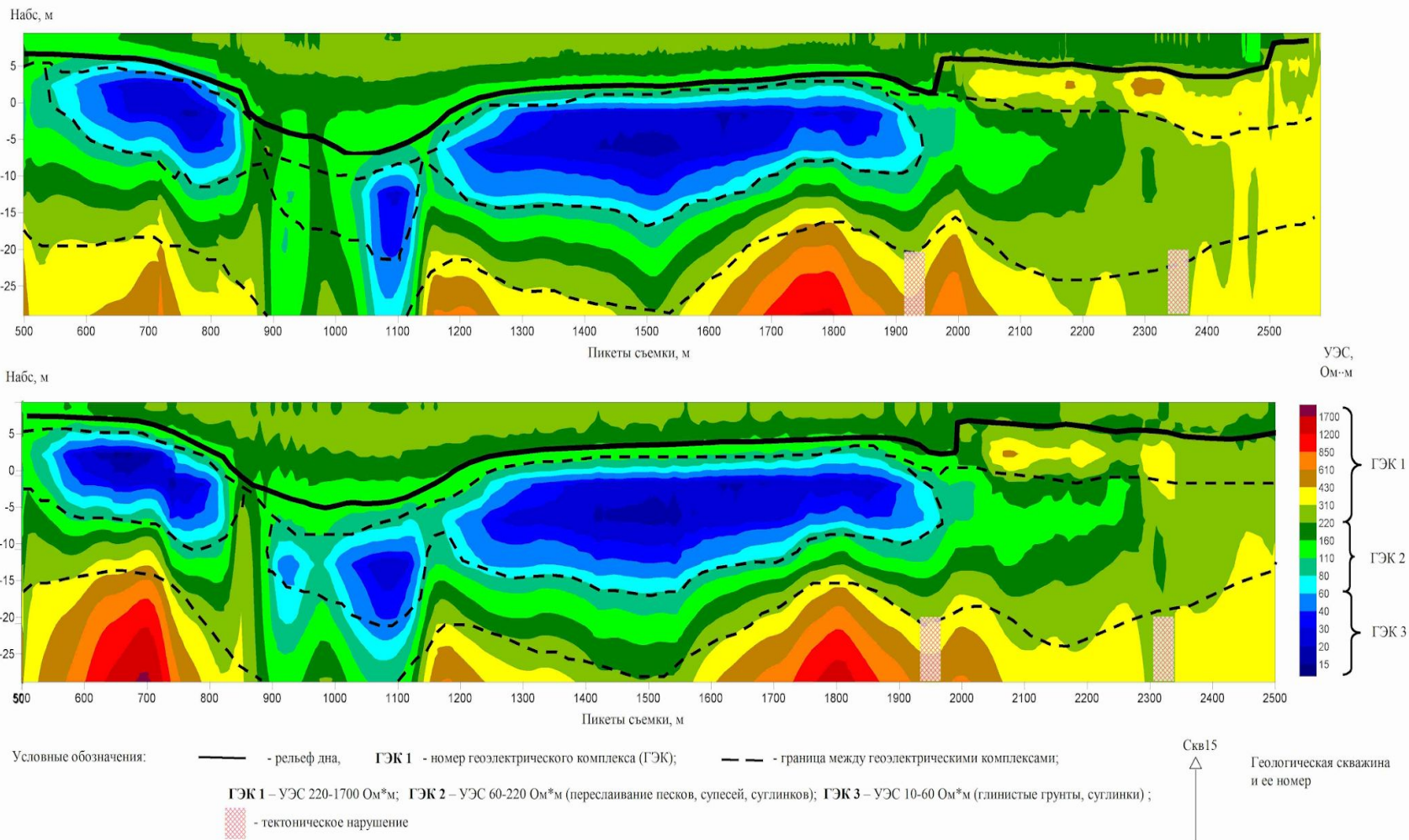
Геоэлектрическая томография



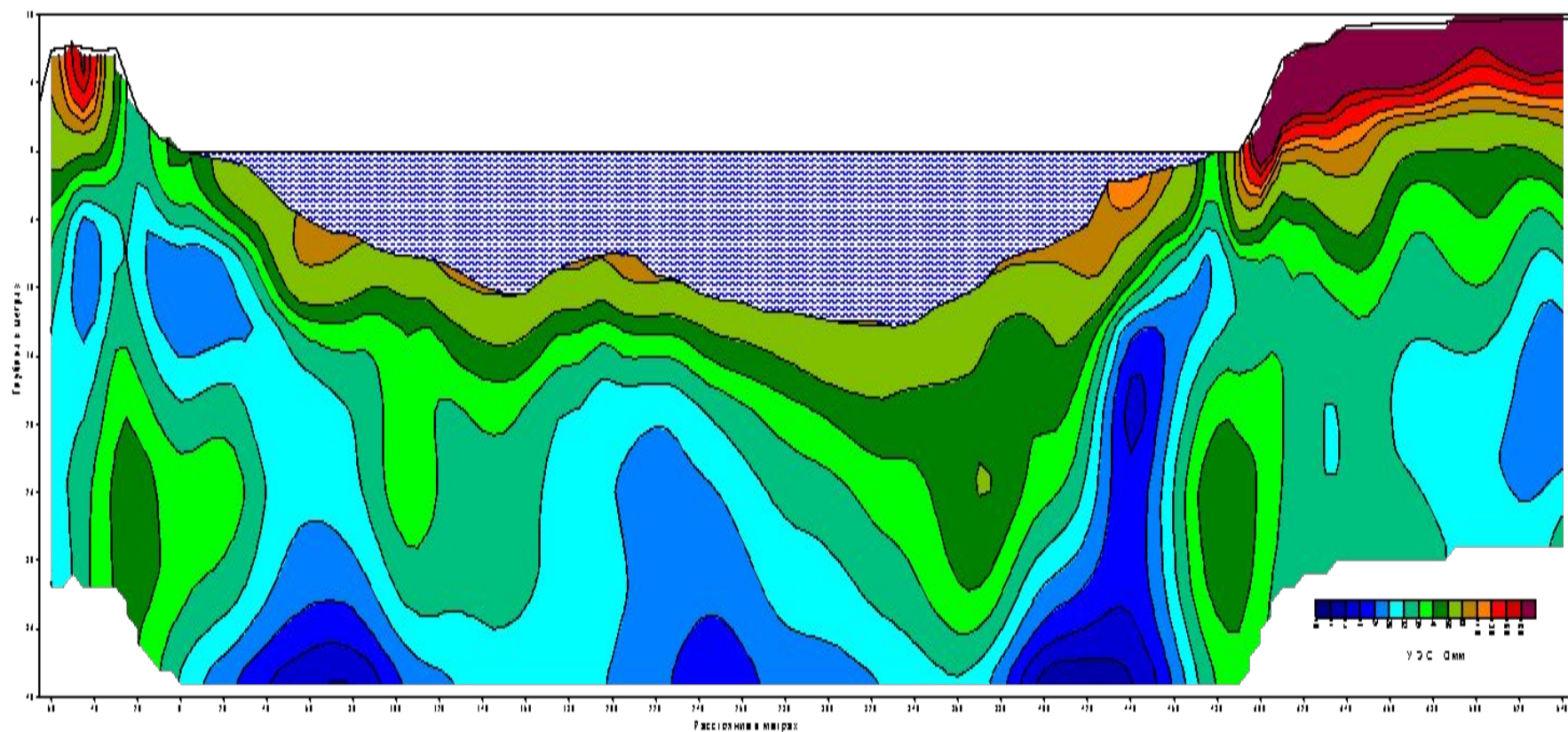
Геоэлектрическая томография с комплектом электроразведочной аппаратуры: универсальный измеритель «МЭРИ», мультимастотный генератор «Астра» (4,88 Гц).

Гидроэлектроразведочная коса, электроразведочная станция ИМПВ и мультимастотный генератор «Астра». Максимальный разнос АВ - 200м. Размер приемных диполей MN = 5 и 10 м. Арифметический шаг 5 м при MN=5 и 10 м при MN=10 м.

Геоэлектрические разрезы русла р.Вуокса

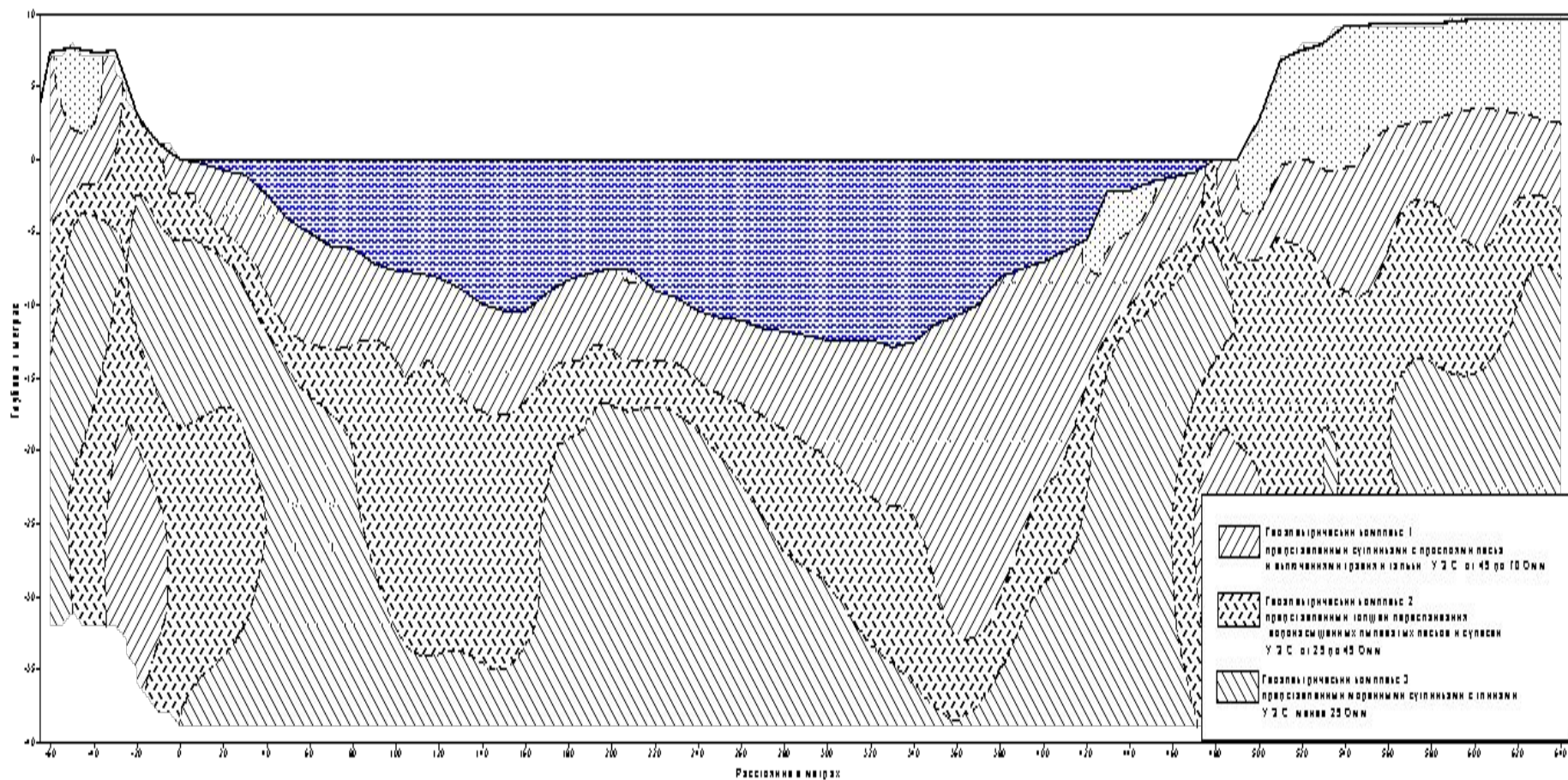


Геоэлектрический разрез р.Нева по данным ГЭТ



Сводный геолого-геофизический разрез р.Нева

Масштаб горизонтальный 1:1000. Масштаб вертикальный 1:200.



Геоэлектрический разрез по профилю ПР0 протекруемого подводного перехода через р.Нева.
Масштаб горизонтальный 1:1000. Масштаб вертикальный 1:200.

Изучение удельных электрических сопротивлений среды – это оценка ее коррозионной активности.

Коррозионная активность

Сопротивление, Ом.м	Коррозионная активность (опасность)
<10	Чрезвычайно высокая
10-30	Очень высокая
30-50	Среда агрессивна
50-100	Среда умеренно агрессивна
100-200	Среда слабо агрессивна
>200	Среда не агрессивна

Комментарий. Шаг по сопротивлению 2-3 раза, почему же ниже 10 нет градаций. В Мексике есть грунты с сопротивлением 5, 2, 1 и 0.1 Ом.м.

Факторы, влияющие на сопротивление ионопроводящих горных пород

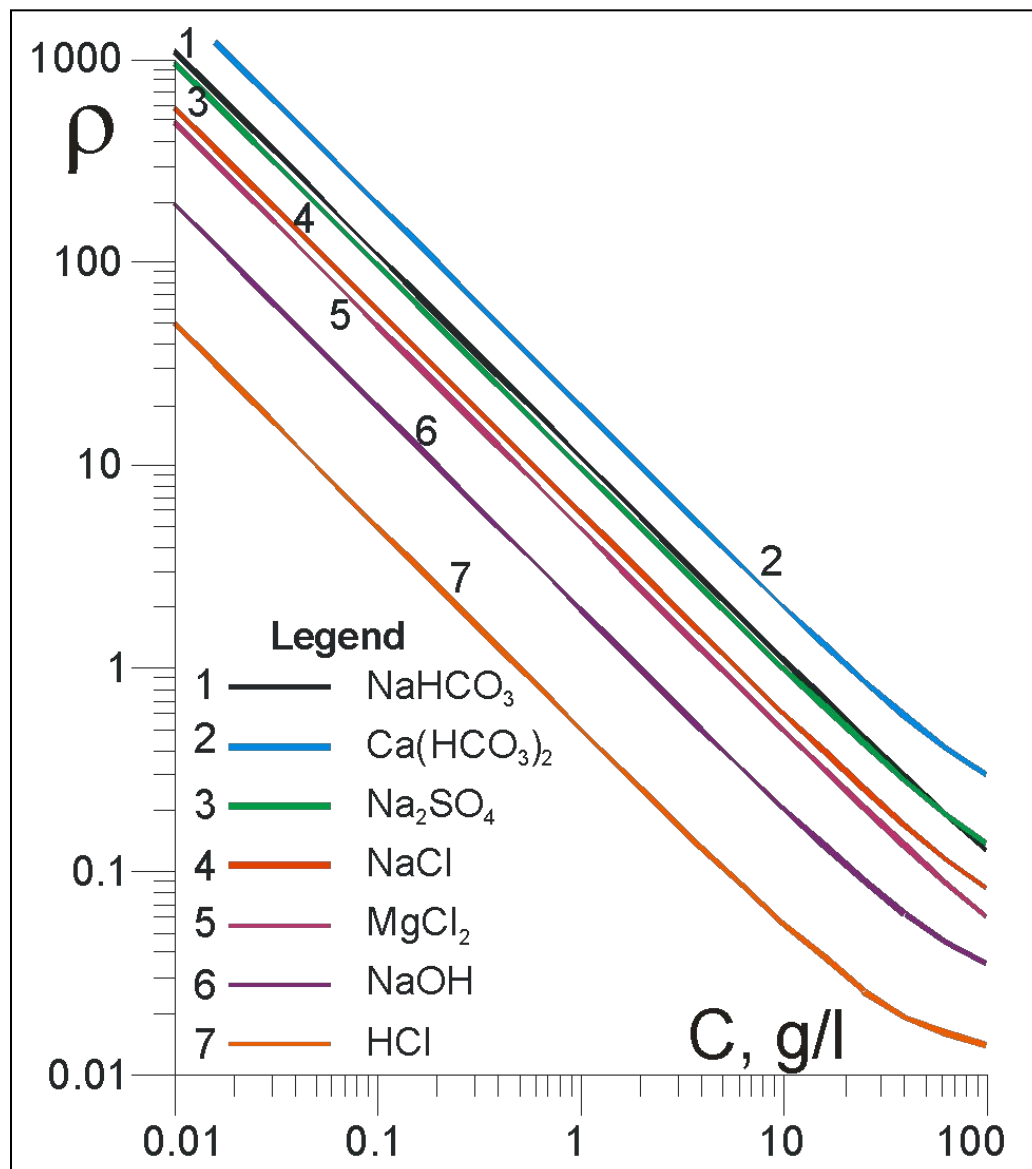
Формула В.Н.Дахнова

$$\rho = R_{\Pi} \cdot R_{В} \cdot R_{Г} \cdot R_{Т} \cdot R_{Э} \cdot \rho_{В}$$

- R_{Π} – параметр пористости,
- $R_{В}$ – параметр влажности,
- $R_{Г}$ – параметр глинистости,
- $R_{Т}$ – температурный параметр,
- $R_{Э}$ - параметр наличия
электронных проводников
- $\rho_{В}$ – сопротивление воды

Влияют такие факторы:
пористость,
влажность,
глинистость,
температура,
минеральный состав
и сопротивление воды
сильнее всего.

Сопротивление воды от состава соли



Смена соли может до 30 раз поменять сопротивление при той же концентрации. Для более точных выводов надо интересоваться типом соли в поровой влаге пород.

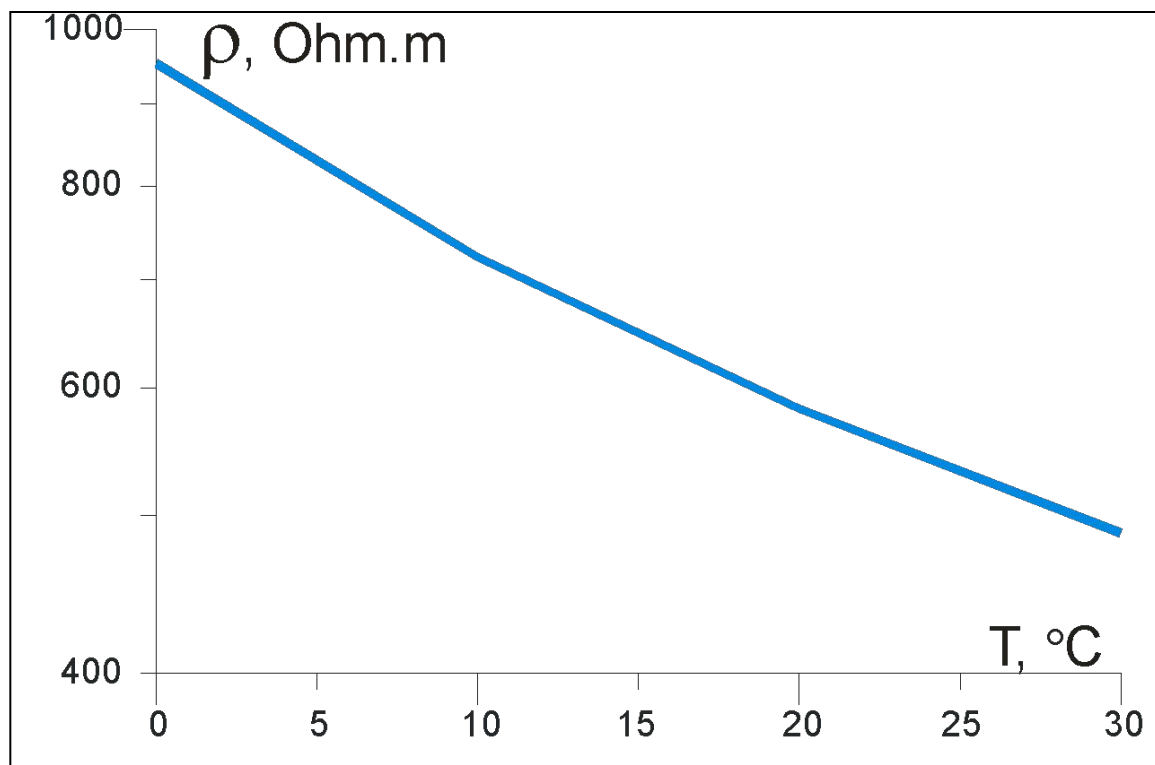
До 5 г/л зависимость ρ обратно пропорциональна C . Потом - отклонения, связанные с пределом растворимости.

$$\rho = \frac{6}{C}$$

Эта формула хорошая и плохая. Очень просто, легко запомнить. Только для NaCl и 20°C . Для солености ниже 5 г/л.

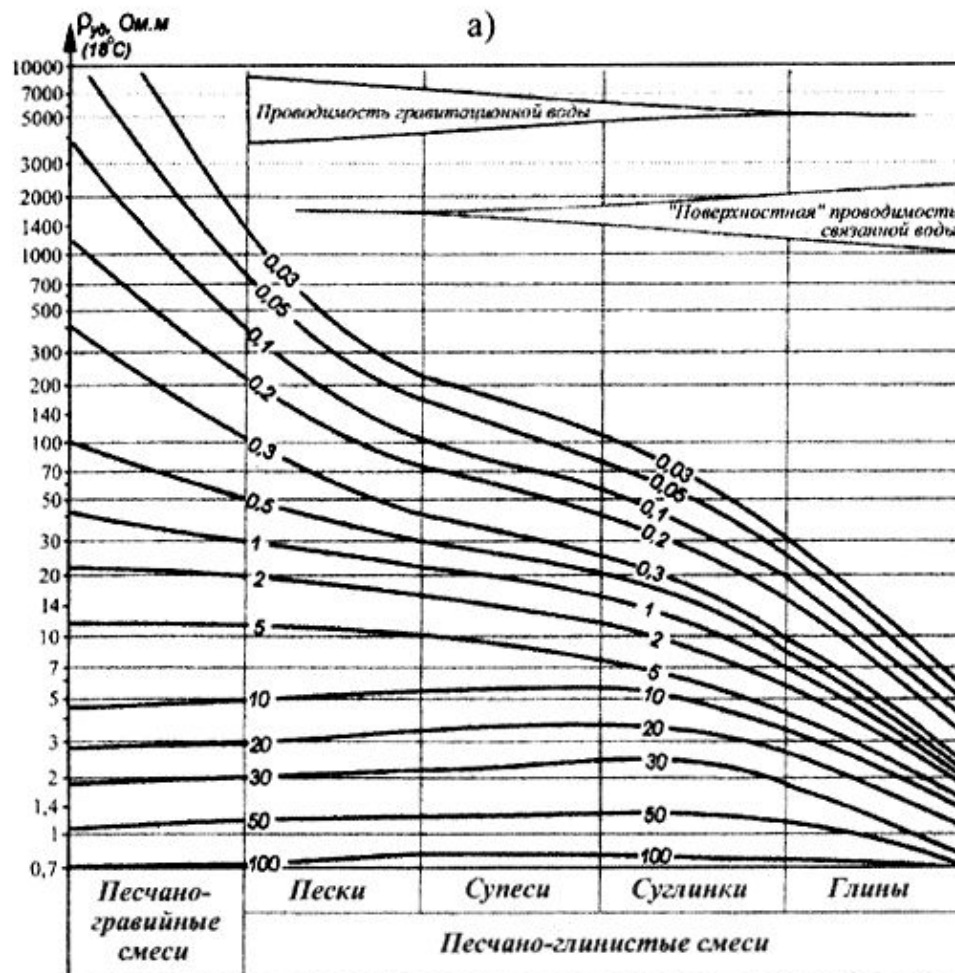
Температура

Температура выше – сопротивление ниже, примерно 2% на каждый градус. Переходить через ноль с этой формулой нельзя, там начинаются фазовые переходы. А так при изменении на 40 градусов температура меняется примерно вдвое.



ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ (УЭС)

ОТ СОСТАВА ГРУНТА И МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ

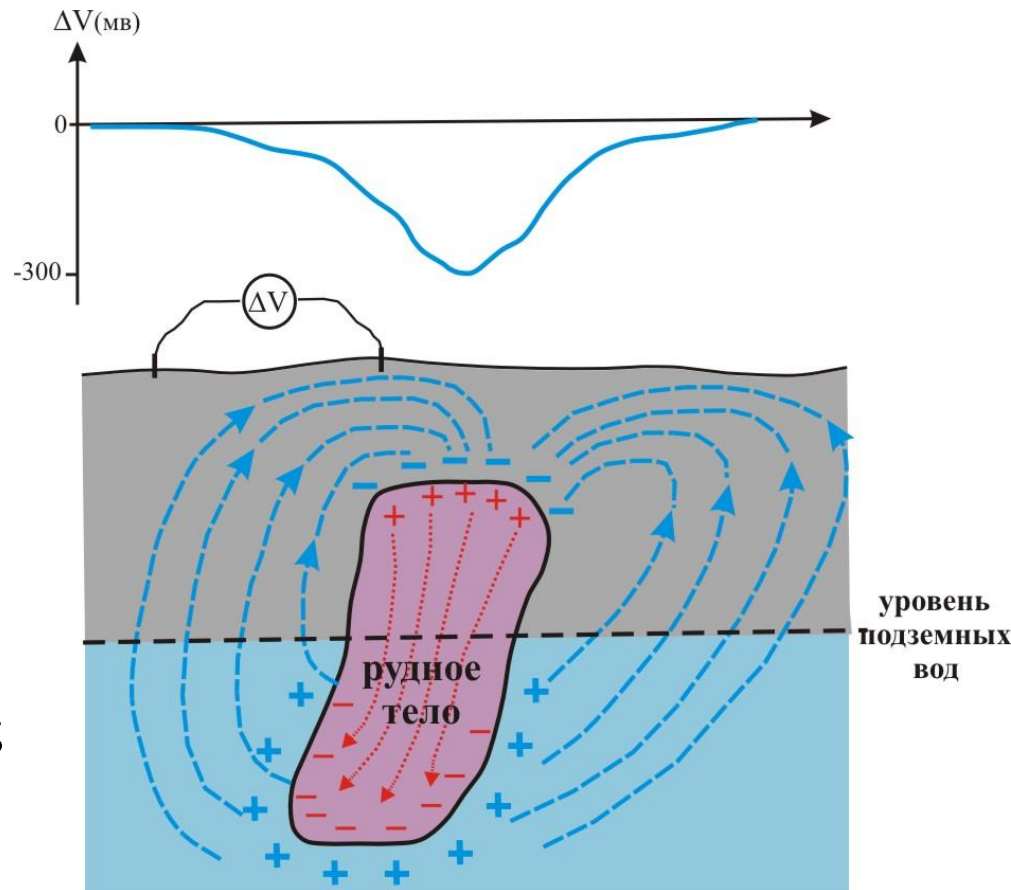


2. Методы изучения полей физико-химического происхождения

- Эти методы применяются для поисков и разведки проводящих руд. Выделяются:
 - **Метод вызванной поляризации (ВП)**. Изучает потенциалы, которые формируются на границах рудных тел под воздействием пропускаемого в Земле электрического тока. ВП применяется при изучении рассеянной руды.
 - **Метод естественного поля (ЕП)**. Имеет дело с природными электрическими полями, обусловленными различными электрохимическими процессами. ЕП применяется при изучении массивной руды.

- Метод изучает природные разности потенциалов над рудными телами:
 - большинство сульфидов (без сфалерита –сульфида Zn),
 - магнетит,
 - графит.
- Природа аномалии ЕП:
 - рудная залежь сложена электропроводящими минералами на фоне вмещающих пород с ионной проводимостью. На границе электронного и ионного проводников создается природный элемент: внутренняя цепь – электронная проводимость; внешняя – ионная. Граница полюсов связывается с поверхностью водоносного горизонта.
- Аномалии преимущественно отрицательные по отношению к фону.

Метод естественного поля



Метод естественного поля

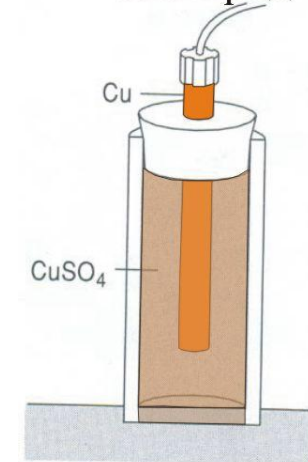
- Потенциал потока – фиксируется когда подземные воды просачиваются через пористые горные породы. Благодаря тому, что положительные и отрицательные ионы двигаются с разными скоростями и некоторые пристаю́т к стенкам пор создается дисбаланс зарядов. ΔV может достигать 1 вольта. Обычно этот феномен не осложняет решение главной задачи – поисков рудных тел, но иногда используется в практике – установление мест просачивания плотин и др.
- Руды обычно отделяются от других источников ЕП, т.к. они создают большие градиенты потенциала с ΔV в десятки мВ на дистанциях в метры (по сравнению с милливольтами от других источников). ΔV между различными участками рудного тела иногда больше 1 В.
- В работах ЕП необходимо иметь маленькие ΔV без получения значительного тока из Земли (иметь высокий импеданс измерительного прибора).

Выполнение съемок

- Как и в методах сопротивлений используются 4 электрода и измеряется разность сопротивлений. Чаще применяются градиентная и дипольная расстановки.
- Так как разность потенциалов маленькая применяются неполяризуемые электроды. Конец металлического стержня (Cu) погружен в раствор соли (CuSO_4). Основание контейнера пористое (неглазированный фарфор): раствор просачивается через него, обеспечивая контакт с землей без поляризации.
- Металлические электроды непригодны: на их поверхности, где электронная проводимость изменяется на ионную ионы аккумулируются и создают потенциал, соизмеримый с изучаемым. В методе сопротивлений это накопление предотвращается изменением направления тока —неск. раз в секунду.

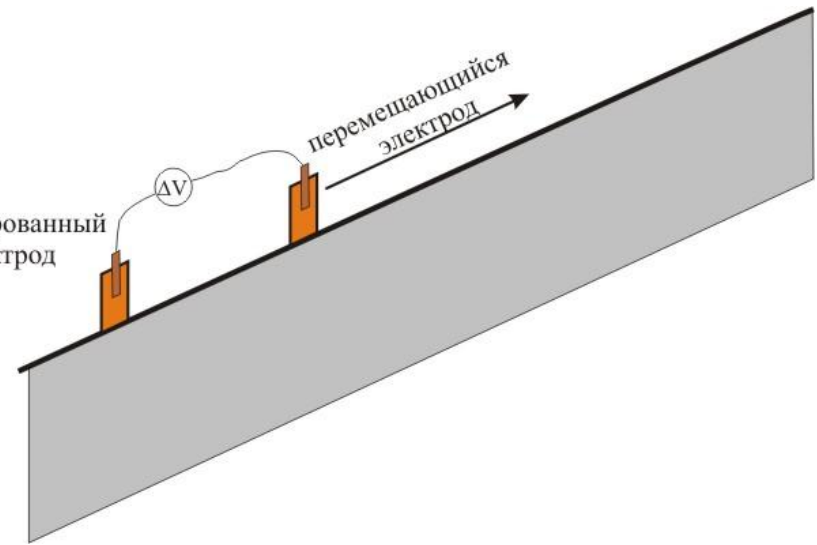


Неполяризующийся электрод

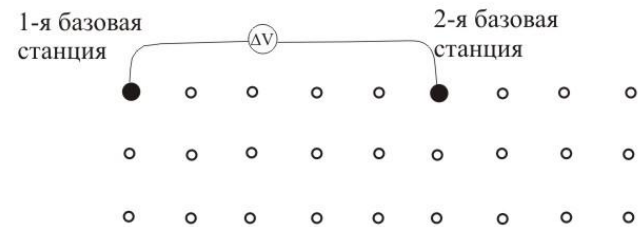


Съемки методом ЕП

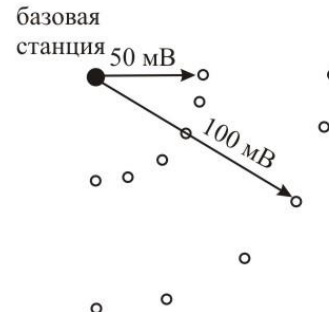
- Измеряется разность потенциалов между точками на поверхности. Прибор легкий маленький, т.к. перед ним не ставится зад вводить ток в Землю- только измерить ΔV интенсивностью от милливольт до 1 вольт.
- Используются неполяризующиеся электроды
- Начало съемки: электроды размещаются рядом – показания д.б. не более первых милливольт. Во влажную погоду – контакт почвой хороший; в сухую – выкопать ямку влажного слоя или налить в нее воду.
- Типы расстановок:
 - а) Движение 2-го электрода от базовой станции по профилю или сети. Для удаленных точек – новая базовая станция. ΔV – суммируются.
 - б) Ищется положение, в котором разность потенциалов между электродами – 50 мВ, 100 мВ и т.д.
 - в) Расстояние между электродами фиксируется и на всех расстановках измеряется ΔV . При построении карты $\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_n$ суммируются.



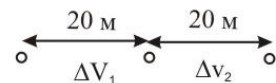
а



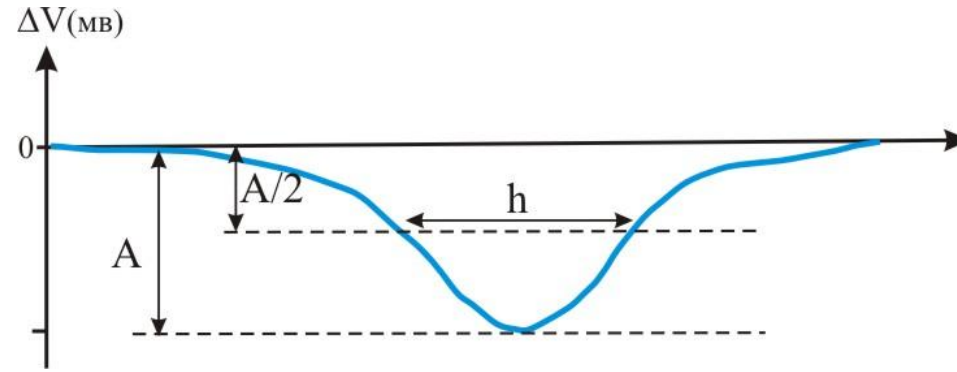
б



в



Интерпретация данных ЕП

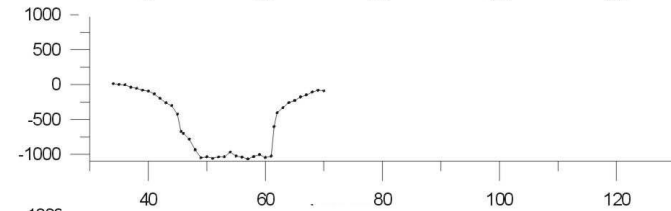
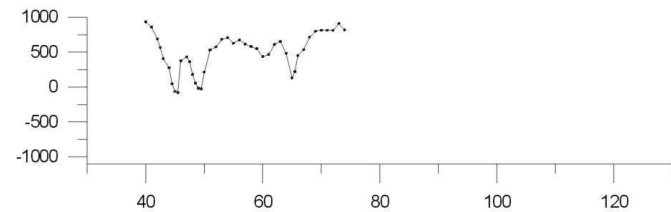
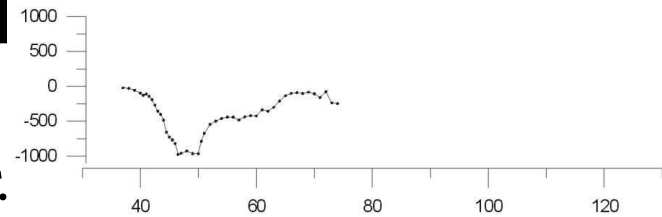
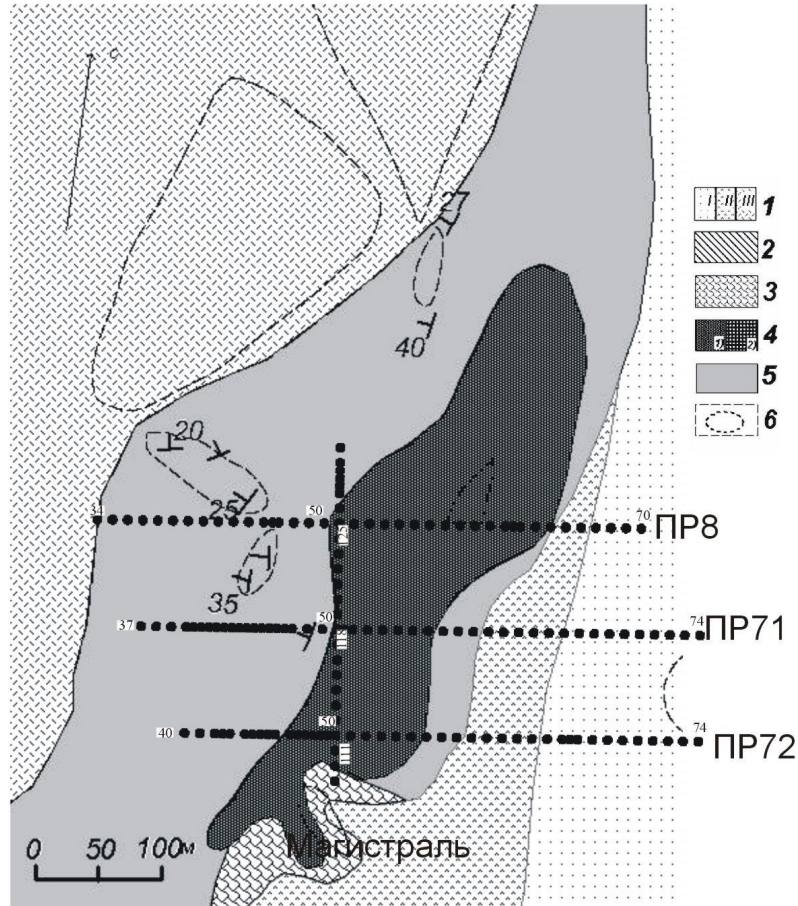


- Интерпретация аномалий ЕП упрощена, т.к. их природа до конца не понятна. Разработаны правила:
 - аномалии > 100 мВ обычно связываются с рудным телом, но не обязательно коммерческого уровня;
 - минимум кривой указывает центр тела;
 - асимметричные аномалии указывают на то, что тело погружается в ту сторону, где изолинии удаляются друг относительно друга или концентрация руды уменьшается в этом направлении;
 - половина ширины аномалии (h) примерно равна глубине тела (но не глубже 30 м – предельной глубины метода ЕП).

Примеры съемок методом ЕП

Карелия. Окрестности пос. Толвуя.

Участок Северная Лебещина, 2005 г.



План изолиний ЕП
Участок Северная Лебещина

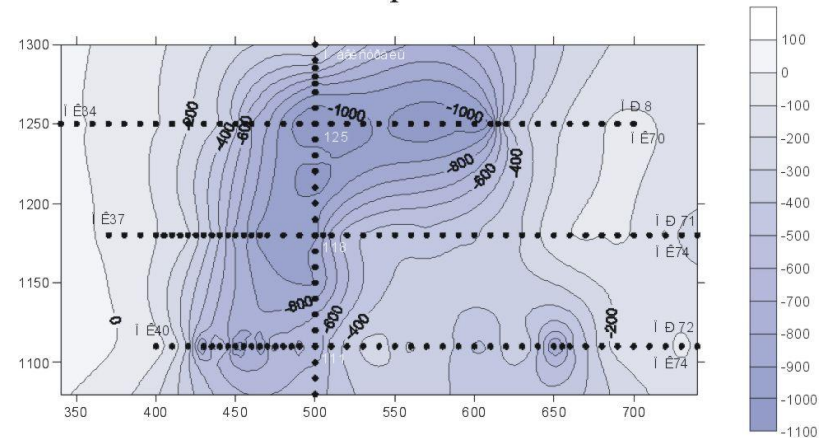


Рис.. Схема геологического строения северной Лебещины (по геологическим данным).
1 – основные породы: перекрывающие горизонт осадочных пород интрузирующие и подстилающие; 2 – участки с жиллами максонитов в габбро-диоритах; 3 – «шунгит-базальтовые» брекчии максонитов; 4 – верхняя часть горизонта На; 5 – нижняя часть горизонта На; 6 – алевролиты, алевропесчанники; 7 – положение геофизических профилей

Выводы

(поля физико-химического происхождения)

- ЕП измеряется небольшая разность потенциалов (до 1 В), создаваемая проводящими массивными рудами (сульфиды, окислы, графит). Меньшие аномалии ЕП могут быть созданы другими процессами (водными потоками) – рассматриваются как шум.
- ЕП измеряется приборами, которые фиксируют очень маленькие значения.