

Геоэлектрика

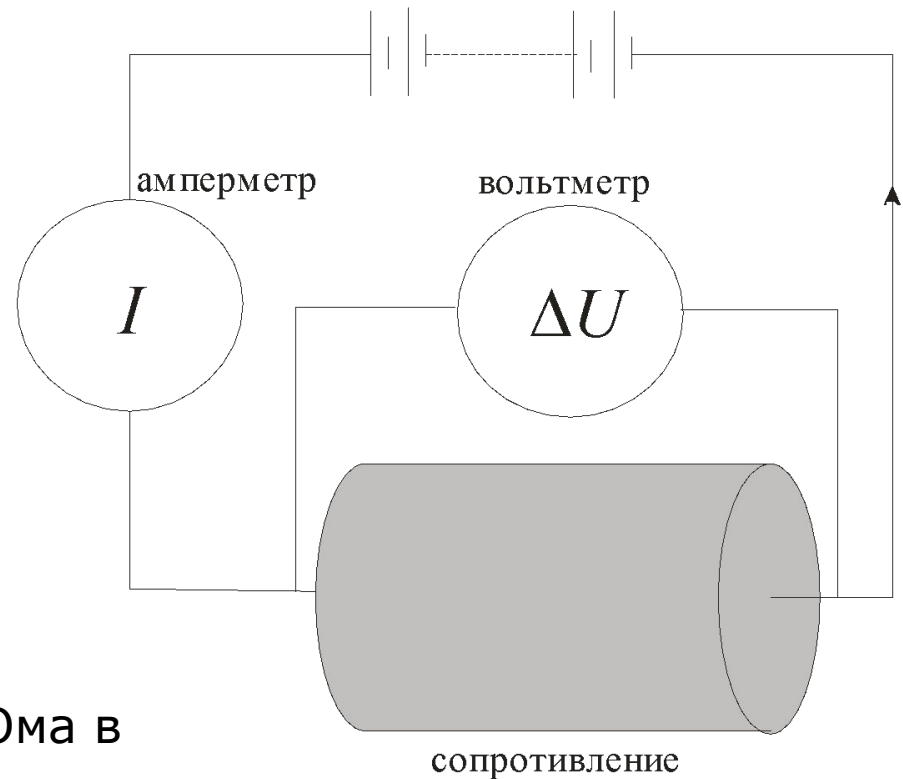
Лекция 7.

7.1 Электрические явления и свойства горных пород

- Электропроводность
 - Электромагнитная индукция
 - Ёмкость
 - Вызванная поляризация
 - Естественная поляризация
-

7.1.1 Электропроводность

$$\Delta U = R \cdot I$$

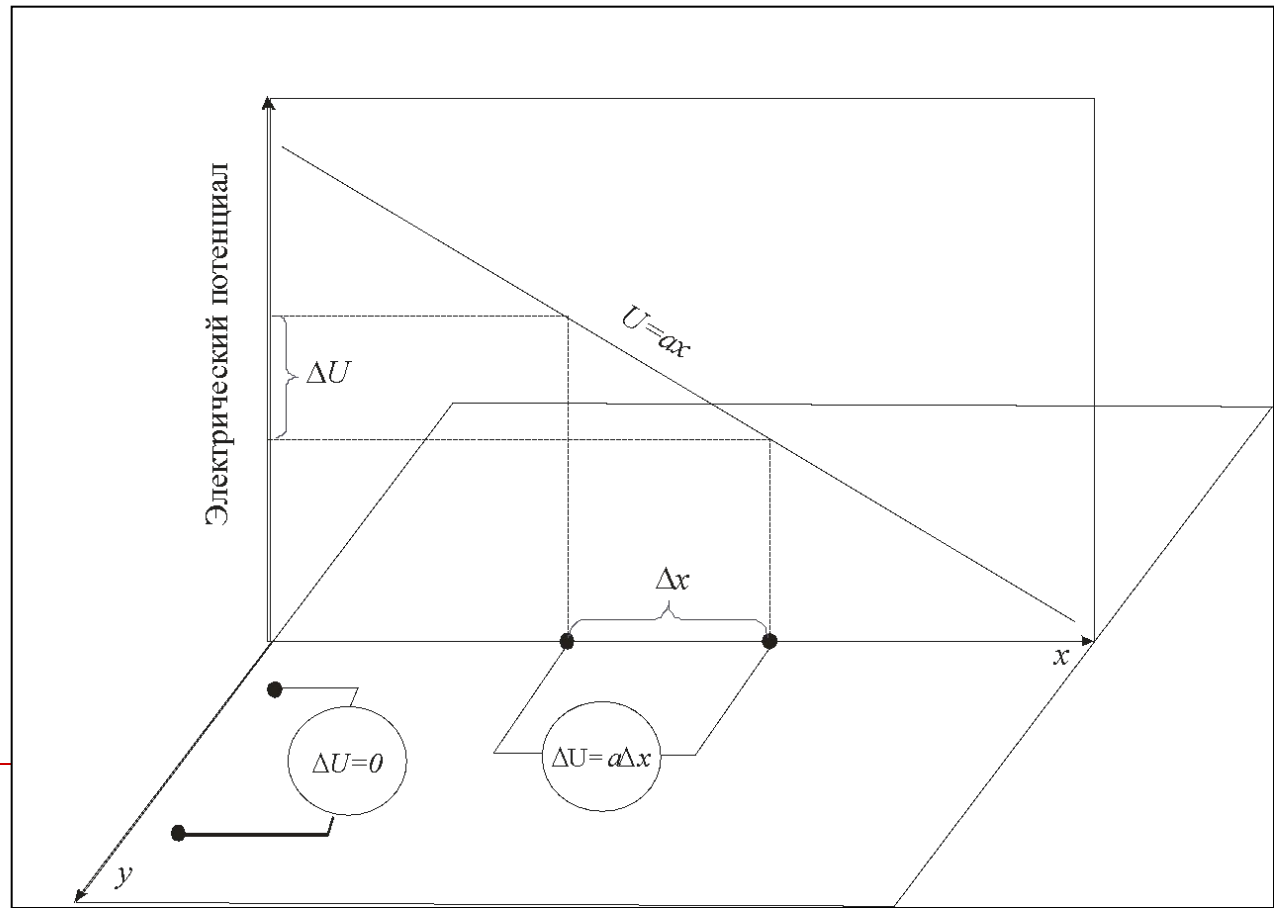


Удобно ли использовать закон Ома в таком виде?

Напряженность электрического поля

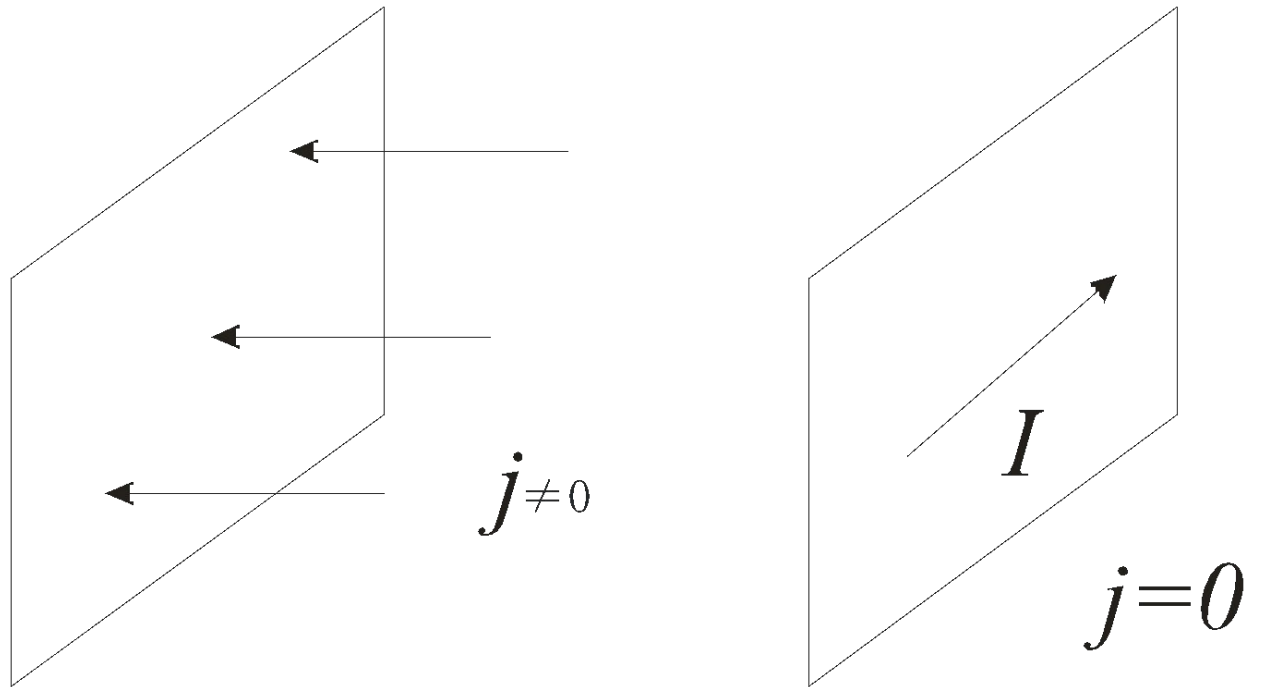
$$\mathbf{E} = -\text{grad}U = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k}\right)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta x}$$



Плотность тока

$$\mathbf{j} = \frac{I}{s} \mathbf{n}$$



Закон Ома в дифференциальной форме

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j}$$

Сравните

$$\Delta U = R \cdot I$$

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

Удельное сопротивление

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

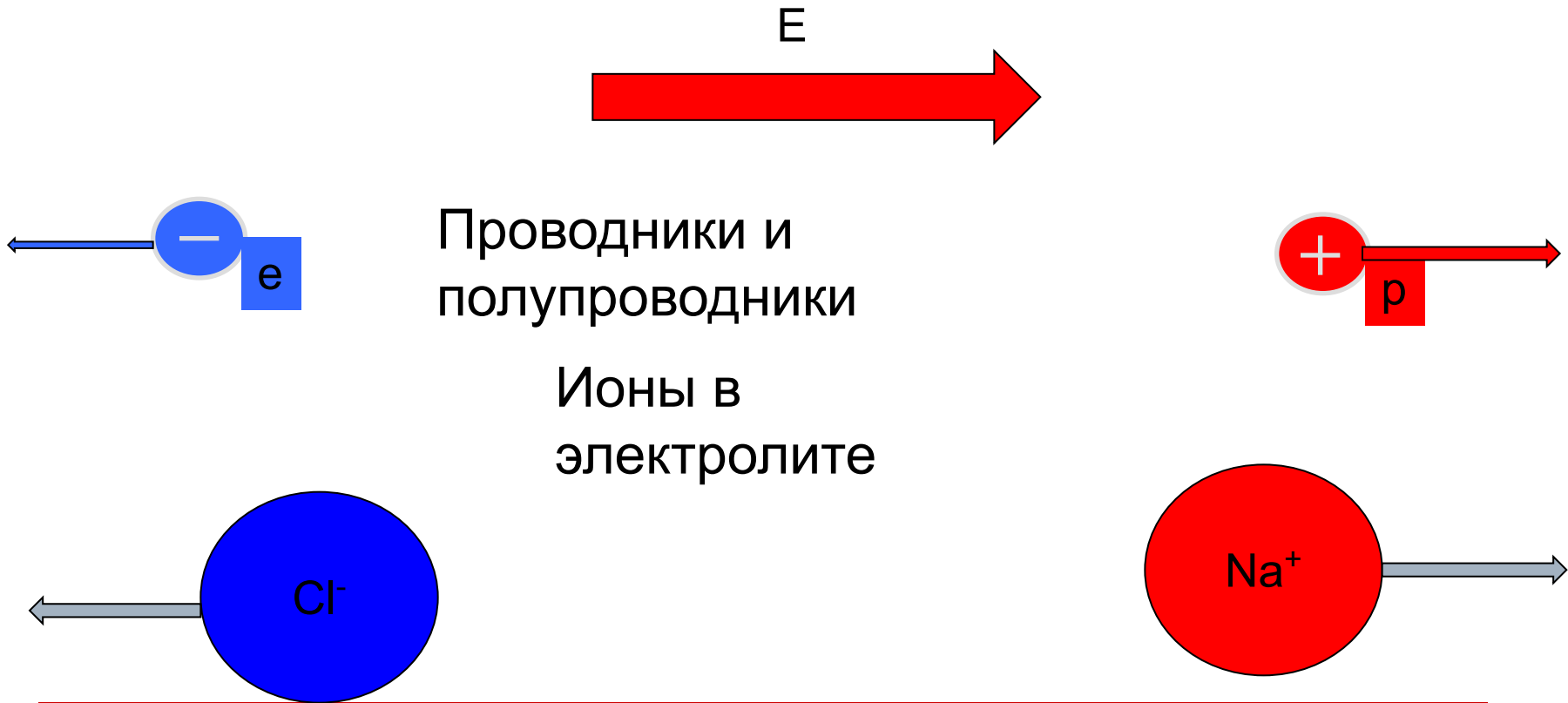
Электропроводность

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$$

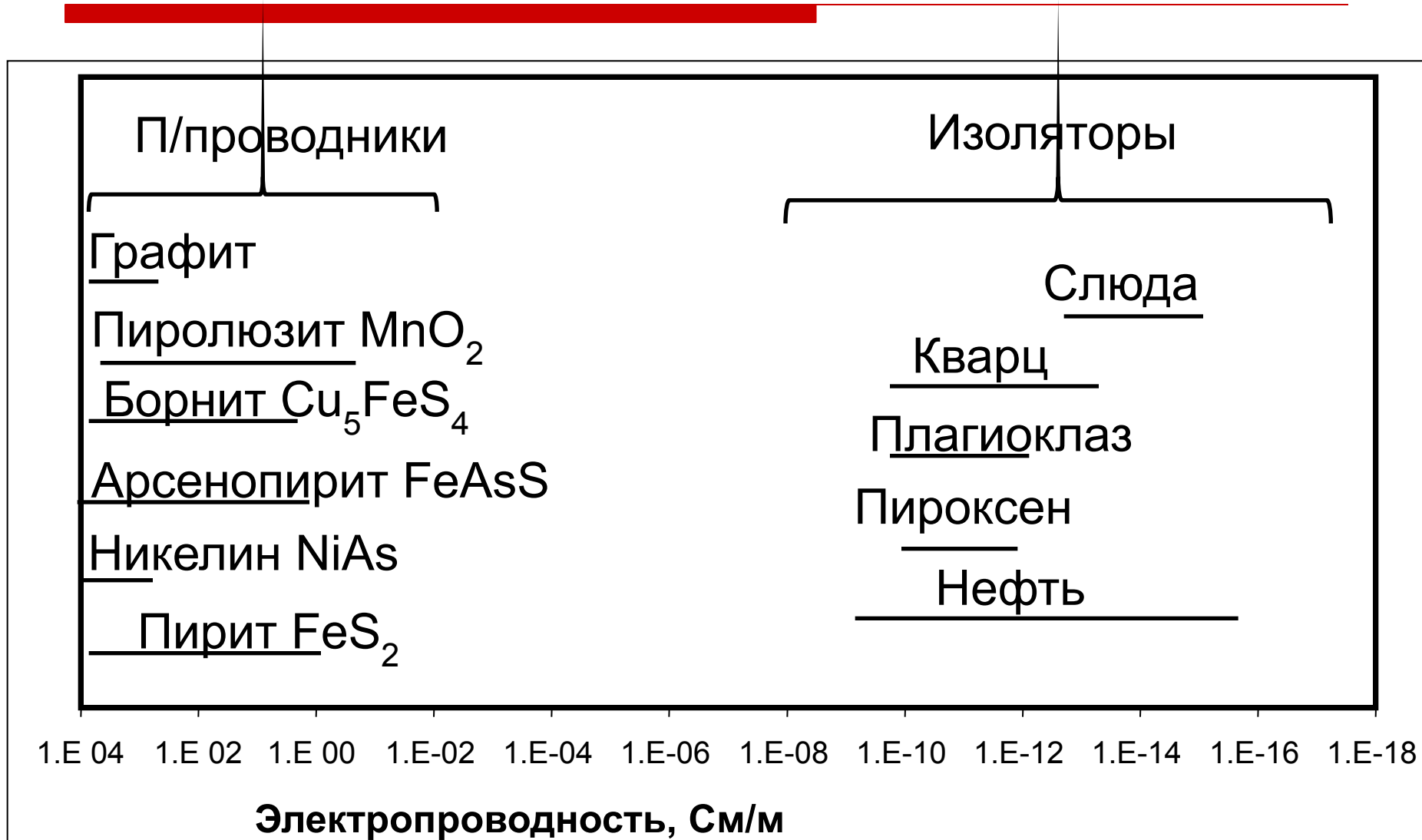
Альтернативная форма записи

Закон Ома отражает линейную связь плотности тока и напряженности электрического поля. Коэффициент пропорциональности – электропроводность – зависит от концентрации свободных (подвижных) носителей заряда.

Механизм электропроводности



Удельное электрическое сопротивление минералов и других гео-материалов



Электропроводность электролитов

$$\sigma_0 = z\Phi\beta C$$

где

C - концентрация ионов в растворе,

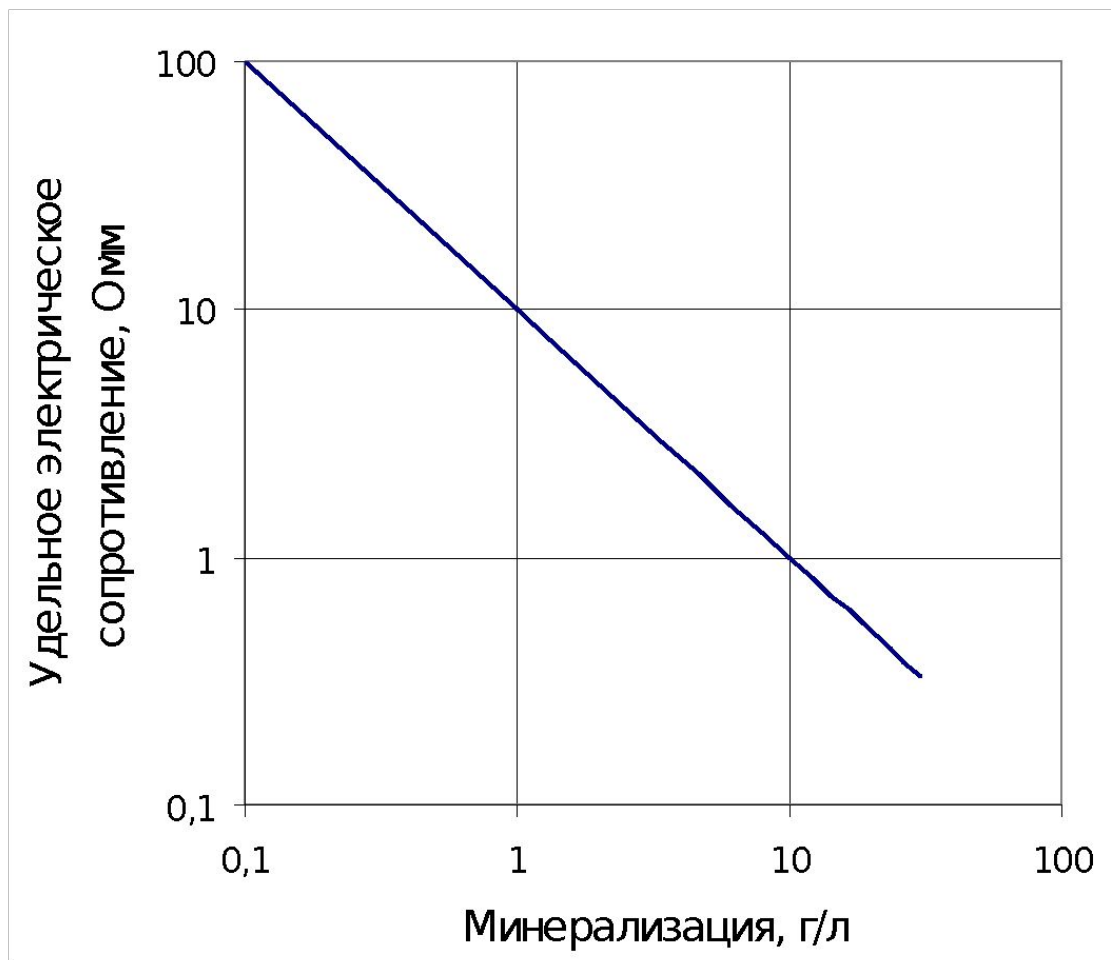
β - их подвижность, т.е. скорость движения ионов в единичном электрическом поле,

z – валентность ионов,

Φ – постоянная Фарадея ($\Phi=96458$ Кл/моль).

Произведение размерностью Кулон/моль есть заряд, который содержит один моль ионов данного типа

Электропроводность электролитов: зависимость от концентрации солей



Электропроводность горных пород: промежуточный вывод

Рудные минералы: самородные, некоторые сульфиды, окислы и графит являются проводниками и полупроводниками.

Породообразующие минералы – “плохие” проводники.

Электропроводность пород связана с растворами, заполняющими поры: она тем больше,

- (1) чем больше пор,
 - (2) чем больше в порах воды и,
 - (3) чем больше концентрация ионов в воде.
-

Удельное сопротивление пород: закон Арчи для полностью водонасыщенных терригенных коллекторов (первый закон Арчи)

$$\rho = F \rho_0$$

Сопротивление породы и воды - пропорциональны

$$F = n^{-a}$$

F - параметр пористости (формационный фактор, Formation Factor $2 < F < 100$);
 a - коэффициент присущий формации ($1.5 < a < 2.5$) $a \sim 2$

Удельное сопротивление пород: закон Арчи для неводонасыщенных терригенных коллекторов (второй закон Арчи)

$$\rho = FS^{-b} \rho_0$$

Сопротивление породы и воды – по прежнему пропорциональны. Однако в неводонасыщенных породах оно возрастает обратно пропорционально насыщенности в некоторой степени b

S = Объем воды / Объем пор -
водонасыщенность;

b – коэффициент присущий формации
($1 < b < 2.5$) $b \sim 2$? **Еще требует уточнения!**

Законы Арчи допускают простое физическое истолкование:

удельное сопротивление породы:

(1) Прямо пропорционально удельному сопротивлению воды, содержащейся в ее порах длине токовых путей (извилистости пор)

(2) Обратно пропорционально доле сечения породы, которое занято водой.

Увеличение пористости и водонасыщенности приводит к уменьшению удельного сопротивления породы.

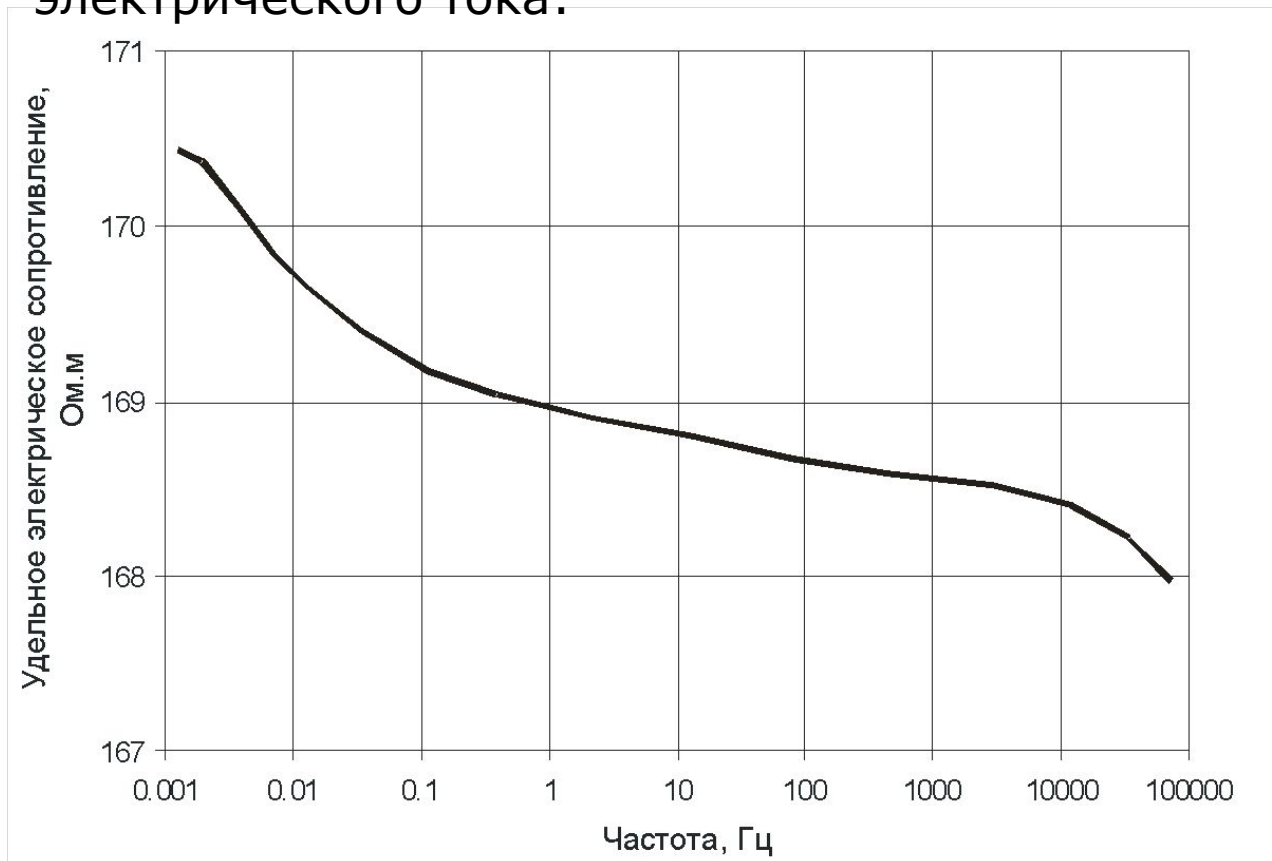
Температурная зависимость сопротивления

$$\rho(t) = \rho_{18} (1 + \alpha(18 - t))$$

где ρ – сопротивление при 18°C,
 α – коэффициент, равный 2.2×10^{-2}
градус⁻¹,
 t – температура (°C).

7.2.1 Вызванная поляризация

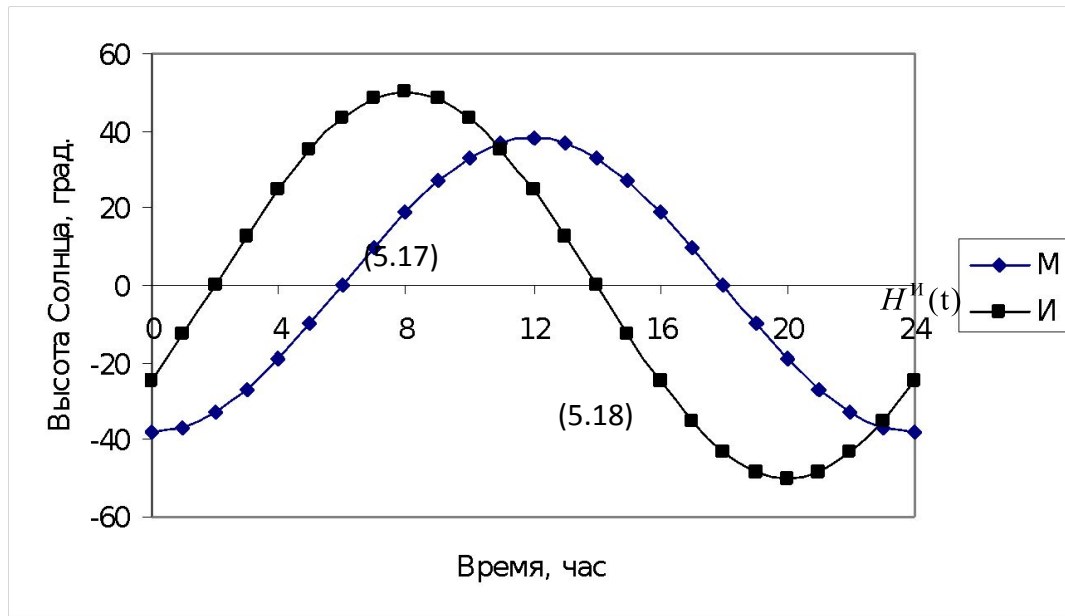
Измерим сопротивление при разных частотах электрического тока:



Зависимость абсолютной величины удельного электрического сопротивления песчаника от частоты тока

Что такое фазовый сдвиг?

Негеологический пример: как его описать математически?



Зависимость высоты стояния Солнца от времени для Москвы (М) и Иркутска (И)

Москва

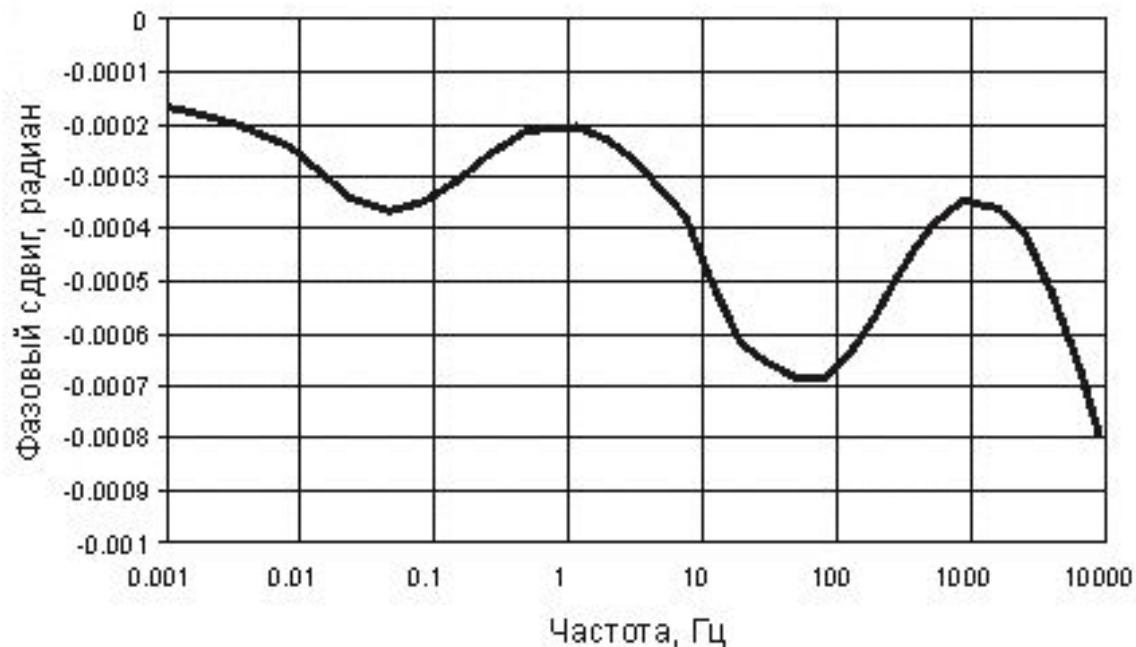
$$\dot{H}^M(t) = H_0^M \sin(\omega t)$$

Иркутск

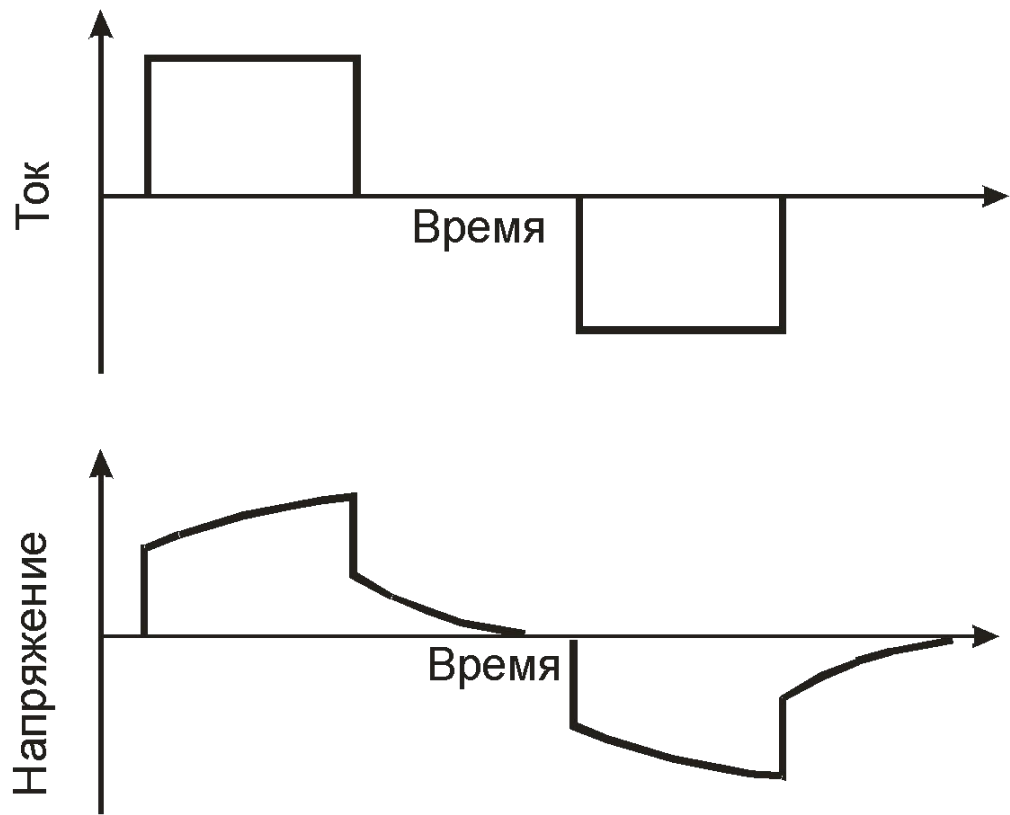
$$\dot{H}^I(t) = H_0^I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} \varphi\right)$$

Фазовый сдвиг, радиан, φ в часах

Зависимость фазы удельного сопротивления от частоты



Отклик напряжения на включение и выключение тока, проходящего в породах



Три эффекта:
зависимость электропроводности от частоты,
фазовый сдвиг между напряжением и током,
а также существование остаточного напряжения отражают одно явление: вызванную поляризацию.

7.1.3. Спонтанная (естественная) поляризация

Законы
ПОТОКОВ:

$$q = -\lambda \text{grad} T$$

Тепла
(Фурье)

$$m = -D \text{grad} C$$

Количества вещества (диффузия,
Фика)

$$w = -\frac{k}{l} \text{grad} P$$

Флюида (воды,
Дарси)

$$j = -\sigma \text{grad} U$$

Заряда
(Ома)

Обобщенный закон потоков

$$j = -(\sigma \text{grad}U + l_t \text{grad}T + l_c \text{grad}C + l_p \text{grad}P)$$

Термоэл.
эффект
(Зеебека)

Потенциал
течения

Электропроводность

Диффузионный потенциал

Можно записать для любого из потоков, не только для потока заряда

Потенциал течения

$$j = -(\sigma \text{grad}U + l_p \text{grad}P)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} \equiv \frac{\partial U}{\partial z} \equiv \frac{\partial P}{\partial y} \equiv \frac{\partial P}{\partial z} \equiv 0$$

$$j = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} - l_p \frac{\partial P}{\partial x}$$

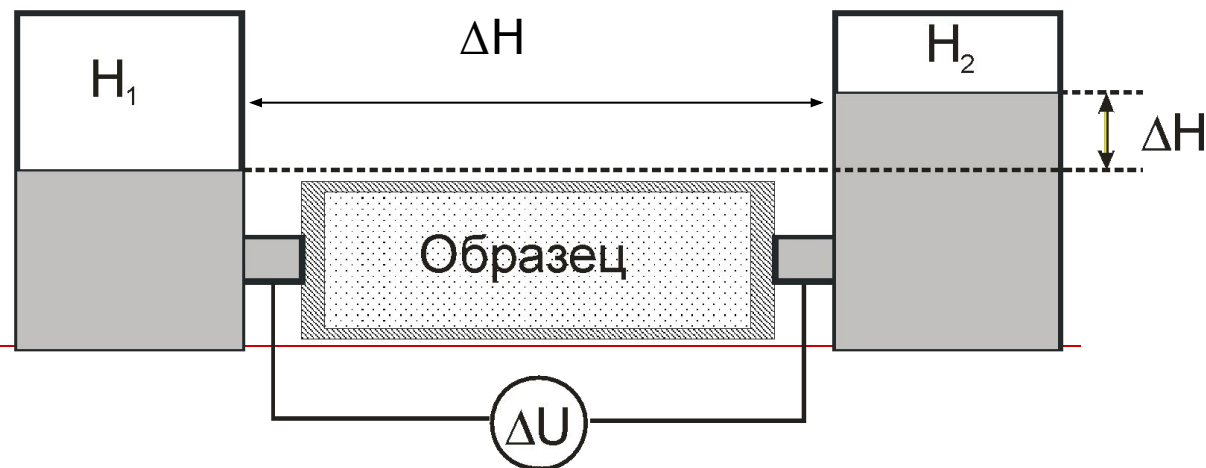
$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{l_p}{\sigma} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\Delta U = -\frac{l_p}{\sigma} \Delta P$$

$$\Delta U = -\frac{l_p \delta g}{\sigma} \Delta H$$

$$P = \delta g H$$

$$C = -\frac{l_p \delta g}{\sigma}$$



Вода в порах содержит электрический заряд. Поэтому, при течении воды происходит перенос заряда, то есть возникает электрический ток и электрическое поле, которое называют потенциалом фильтрации.

Диффузионный потенциал

$$j = -(\sigma \text{grad}U + l_c \text{grad}C)$$

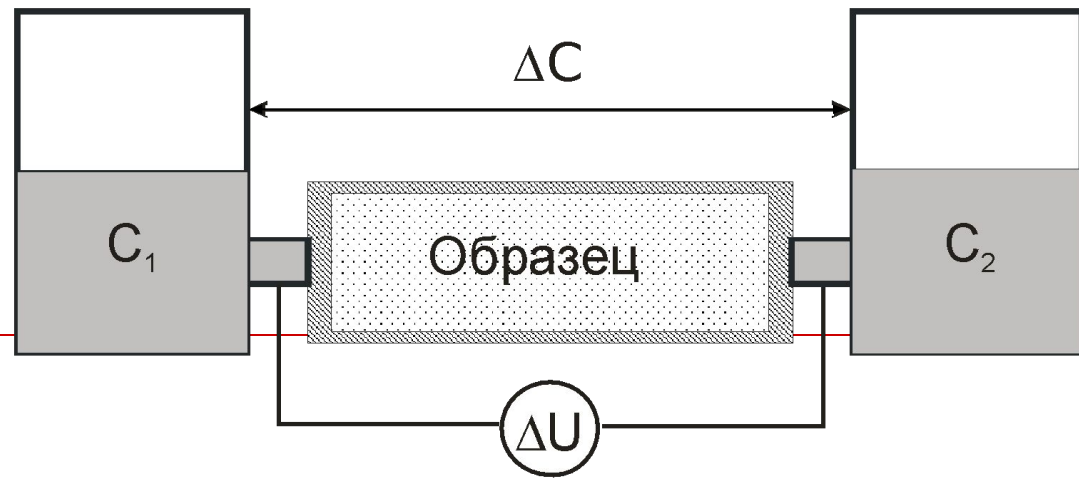
$$\frac{\partial U}{\partial y} \equiv \frac{\partial U}{\partial z} \equiv \frac{\partial C}{\partial y} \equiv \frac{\partial C}{\partial z} \equiv 0$$

$$j = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x} - l_c \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{l_c}{\sigma} \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\sigma = \frac{z\Phi\beta}{F} C$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{l_c F}{z\Phi\beta} \frac{\partial \ln C}{\partial x}$$



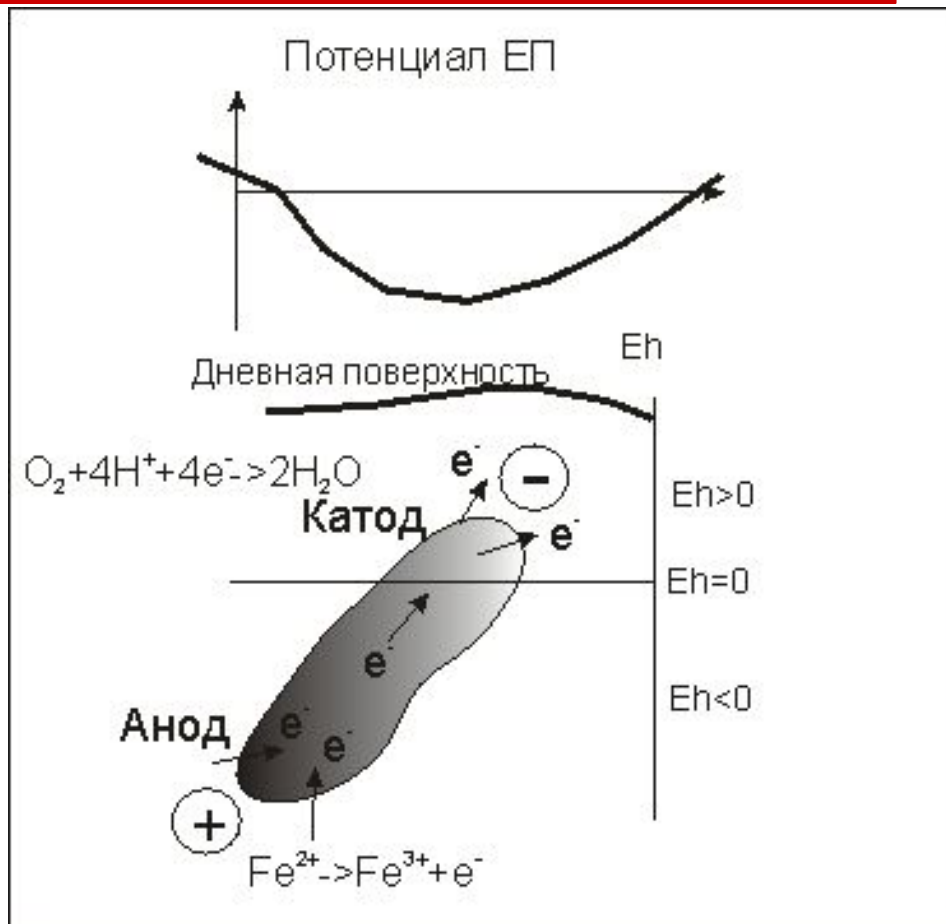
Интегрирование последнего выражения:

$$\Delta U = -\frac{l_c F}{z \mp \beta} \Delta \ln C = -\frac{l_c F}{z \mp \beta} (\ln C_2 - \ln C_1) = -\frac{l_c F}{z \mp \beta} \ln \frac{C_2}{C_1}$$

$$\Delta U = k_d \ln \frac{C_2}{C_1}$$

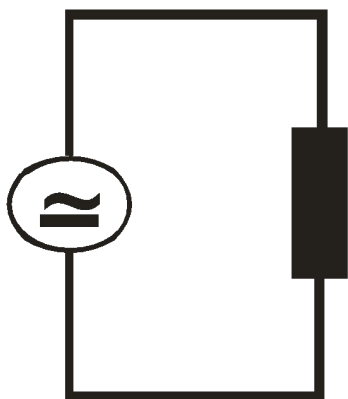
Ионы разного знака имеют разную подвижность, например, хлорид-ион быстрее иона натрия. При диффузии анионы “обгоняют” катионы, что ведет к разделению зарядов, а следовательно, к возникновению электрического поля – диффузионного потенциала.

Потенциалы электрической природы: естественные гальванические элементы



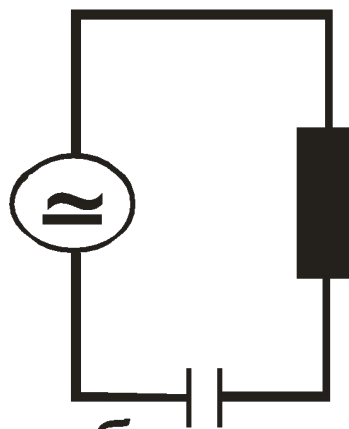
Geo-battery
Гео-
батарея

7.1.4. Электрическая индукция



а.

R



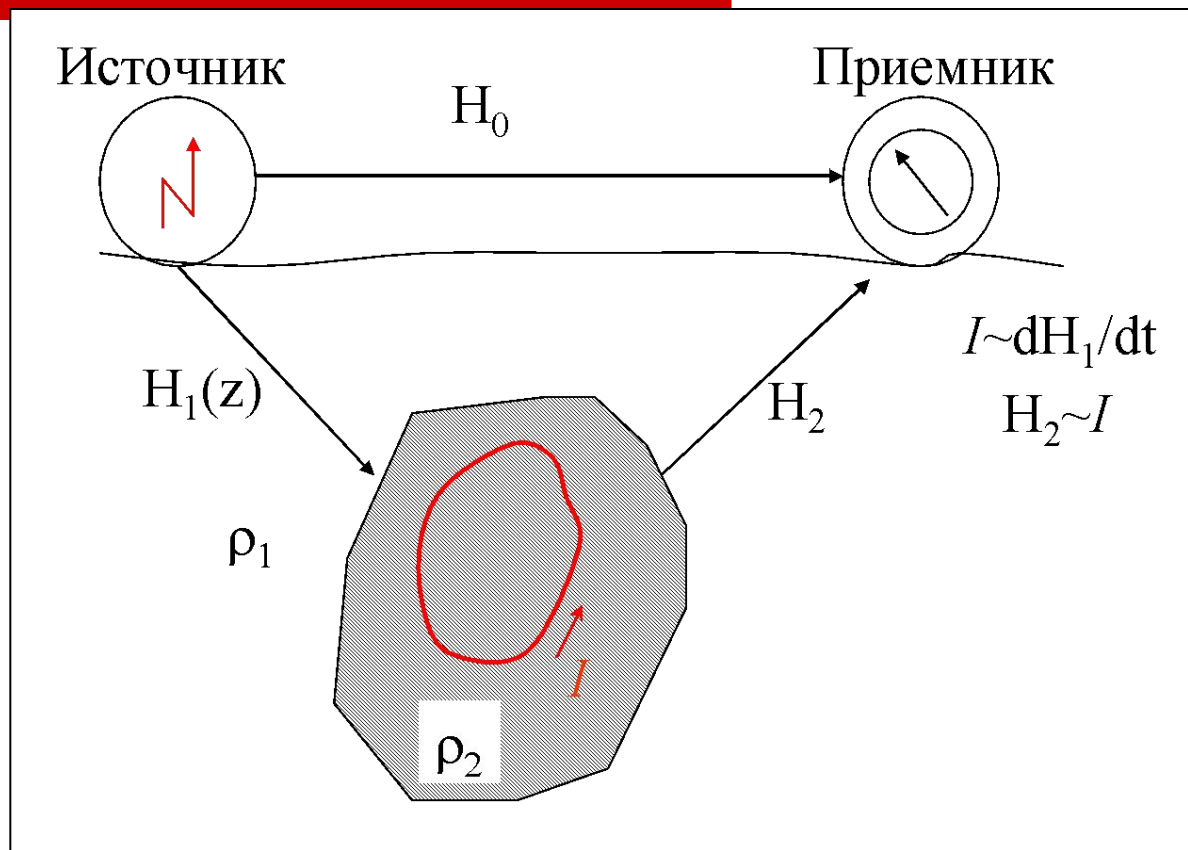
б.

$R - i/2\pi fC$

Диэлектрическая проницаемость ответственна за емкость горных пород

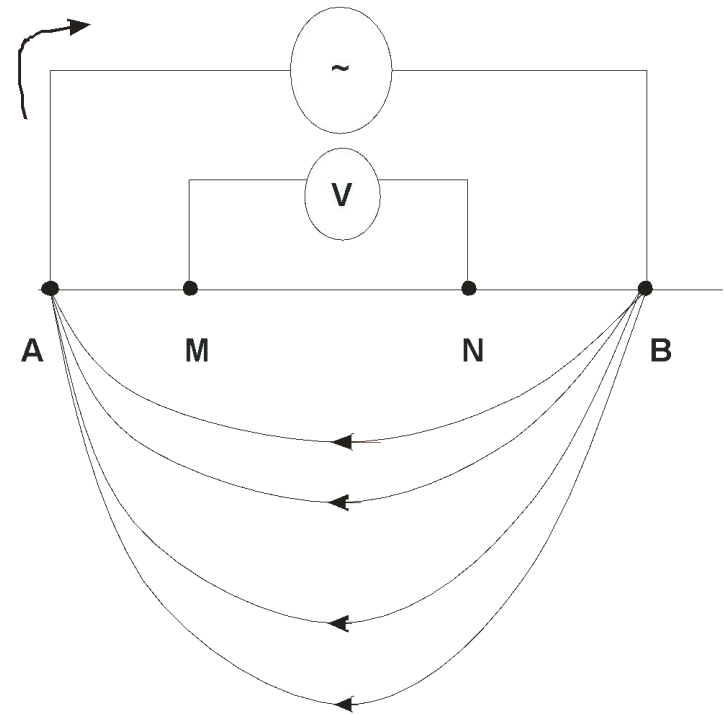
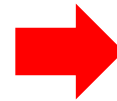
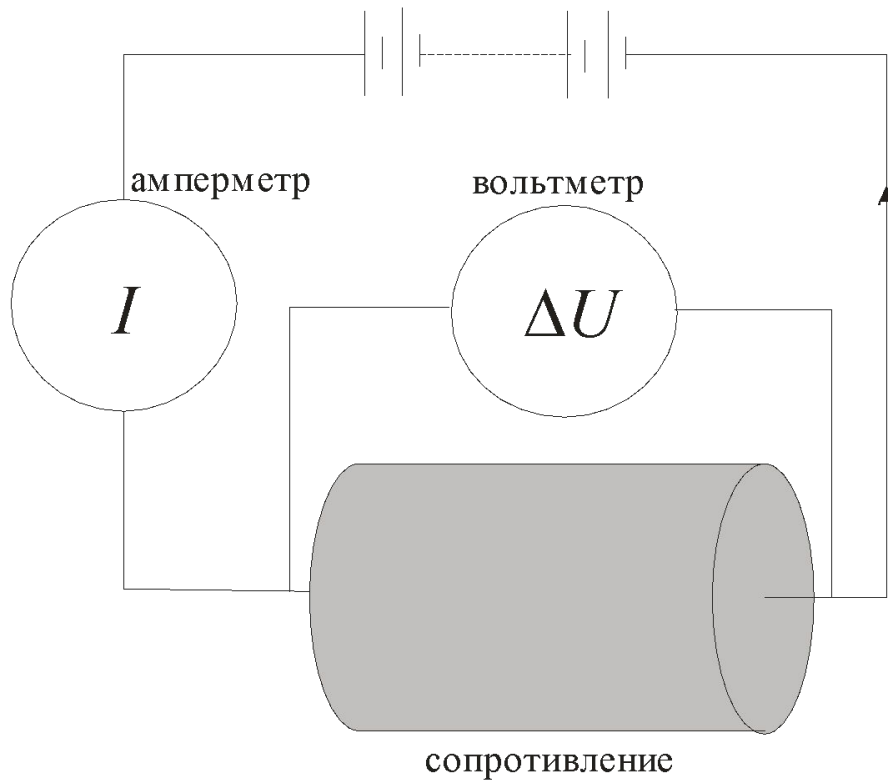
Материал	ϵ
Воздух	1
Вода	81
Лед	3.2
Кварц	3 – 4
Глина	25 – 40
Песок	20 – 30
Гранит	4 – 6
Сланец	5 – 15

7.1.5. Электромагнитная индукция

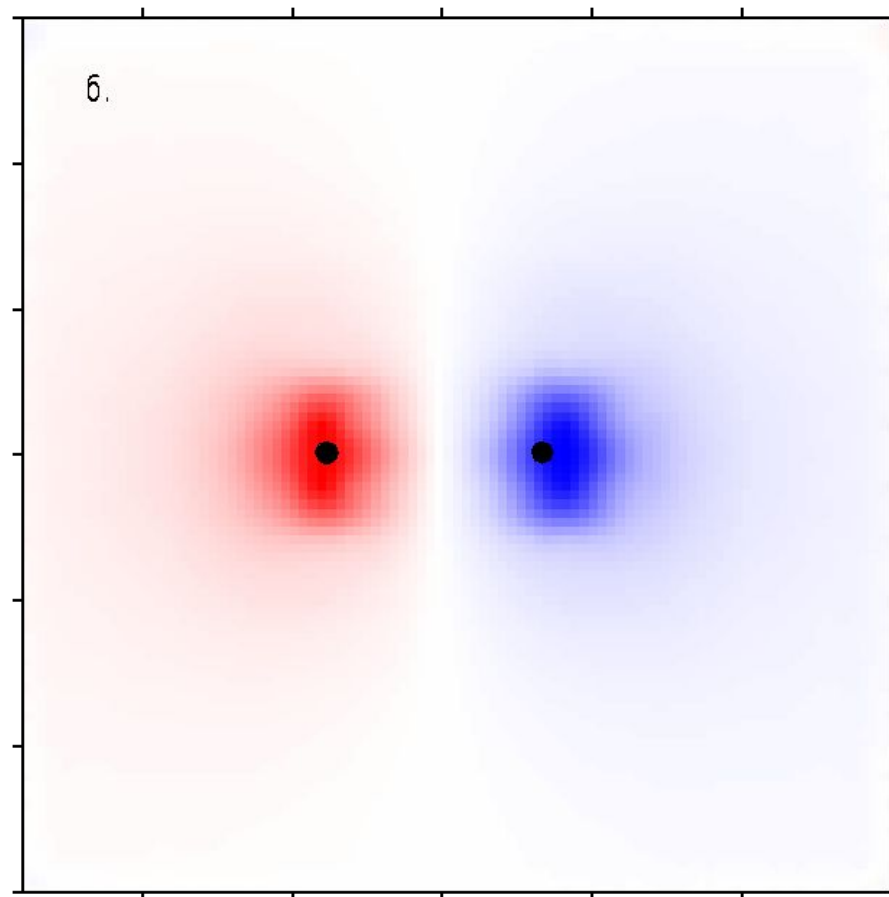
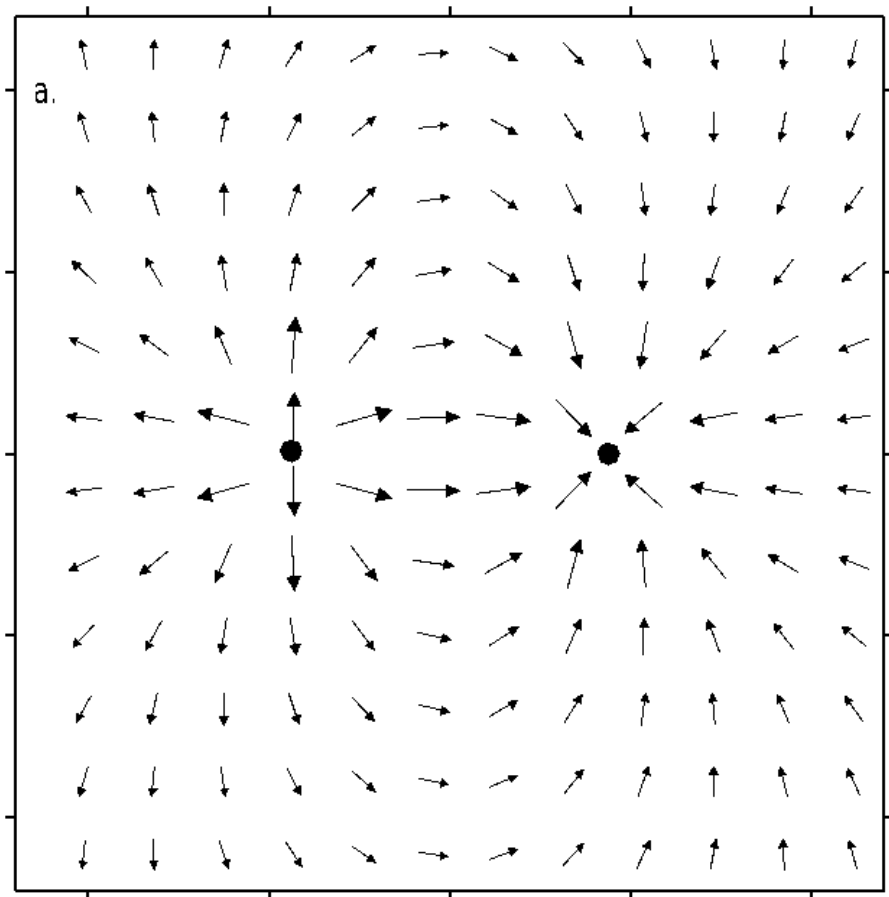


Электромагнитная индукция в Земле при наличии электропроводящего объекта ($\rho_2 \ll \rho_1$). H_0 - первичное магнитное поле источника, H_1 - нормальное магнитное поле в Земле, H_2 - вторичное магнитное поле, вызванное вихревыми электрическими

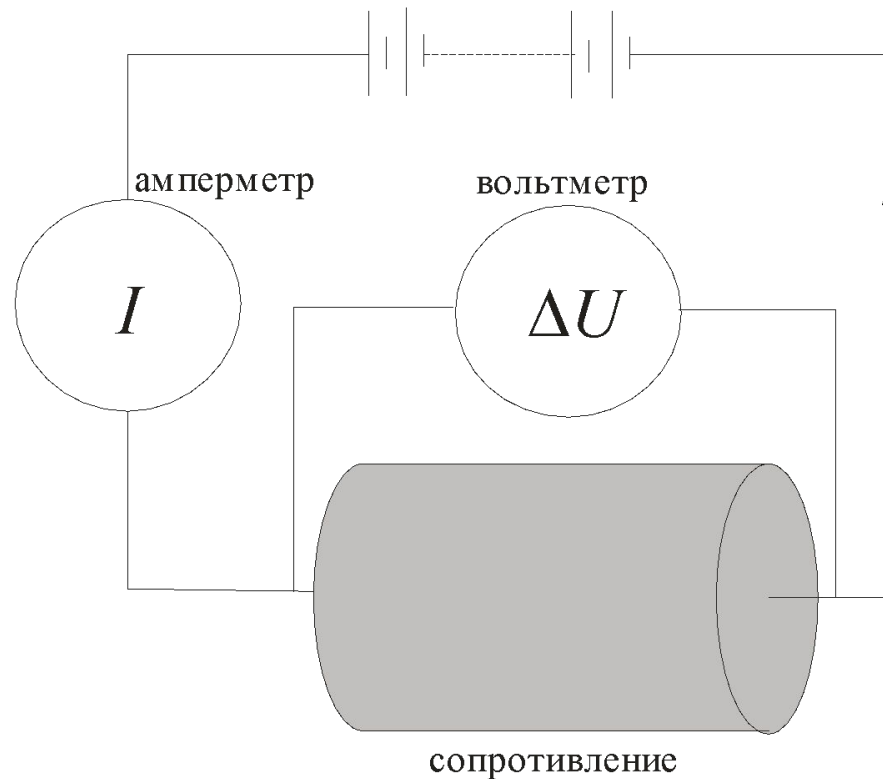
7.2 Метод сопротивления



Потенциал и горизонтальная компонента поля двух заземлений



Как посчитать удельное сопротивление образца?



Как посчитать удельное сопротивление однородной Земли?

Однородная Земля

Неоднородная Земля

$$\rho = k \frac{U_{MN}}{I_{AB}}$$



$$\rho_k = k \frac{U_{MN}}{I_{AB}}$$

Коэффициент
установки: 2π

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}}$$

Кажущееся удельное электрическое сопротивление – это эффективное удельное сопротивление, вычисленное по значениям напряжения в цепи MN и тока в цепи AB в предположении об однородности Земли

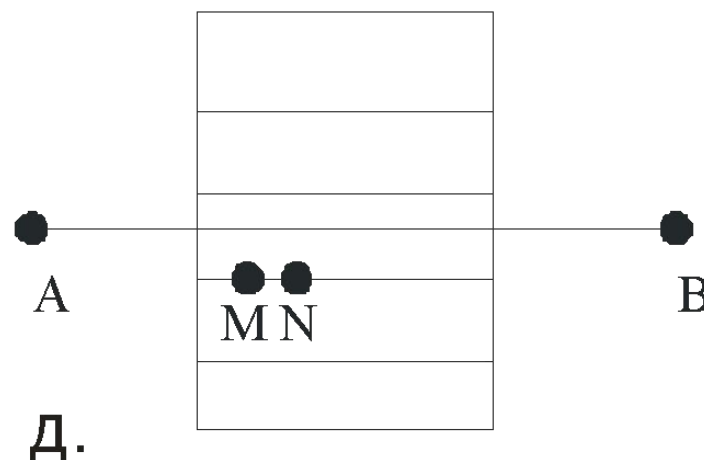
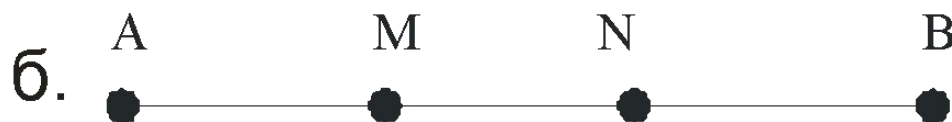
От каких факторов зависит кажущееся сопротивление?

$$\rho_k = k \frac{U_{MN}}{I_{AB}} \sim U_{MN} \approx E \cdot MN \sim j\rho_{MN}$$

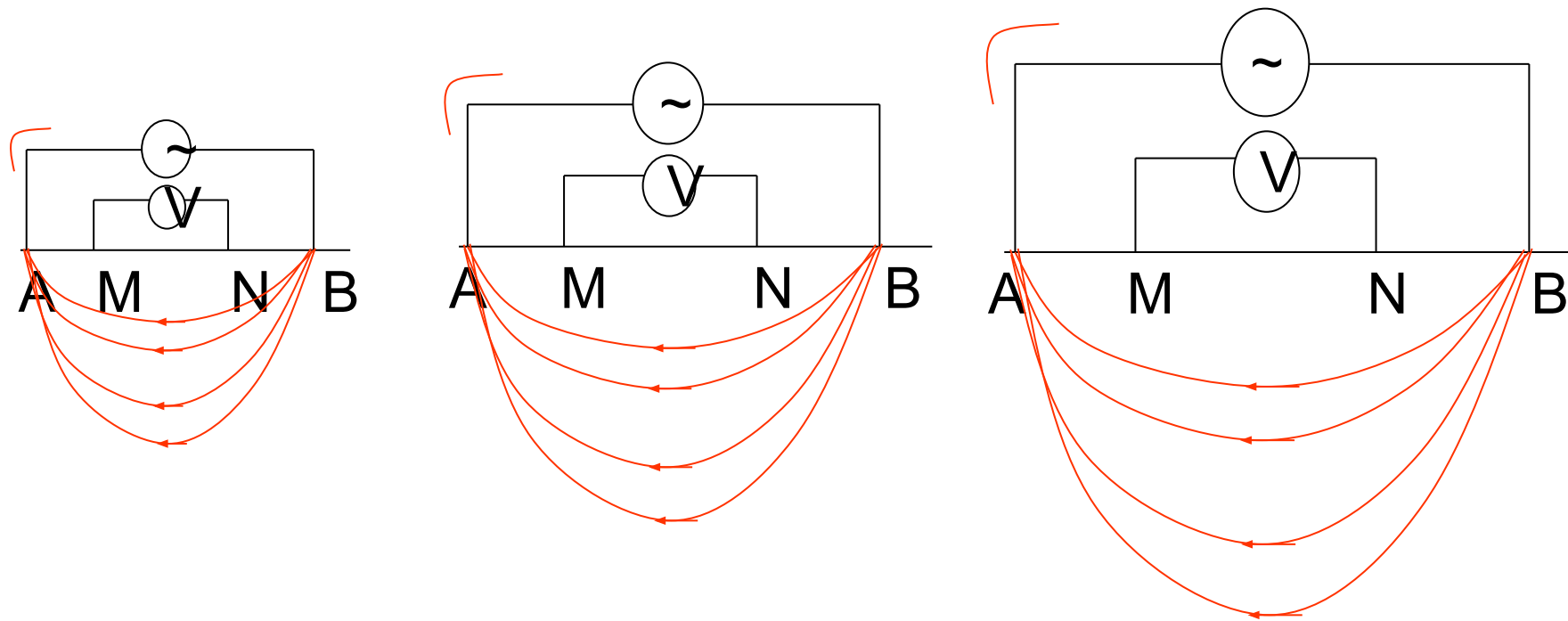
Зависит

- от плотности тока вблизи приемных электродов и
 - от среднего значения удельного сопротивления вблизи приемных электродов
-

7.2.1 Электропрофилирование

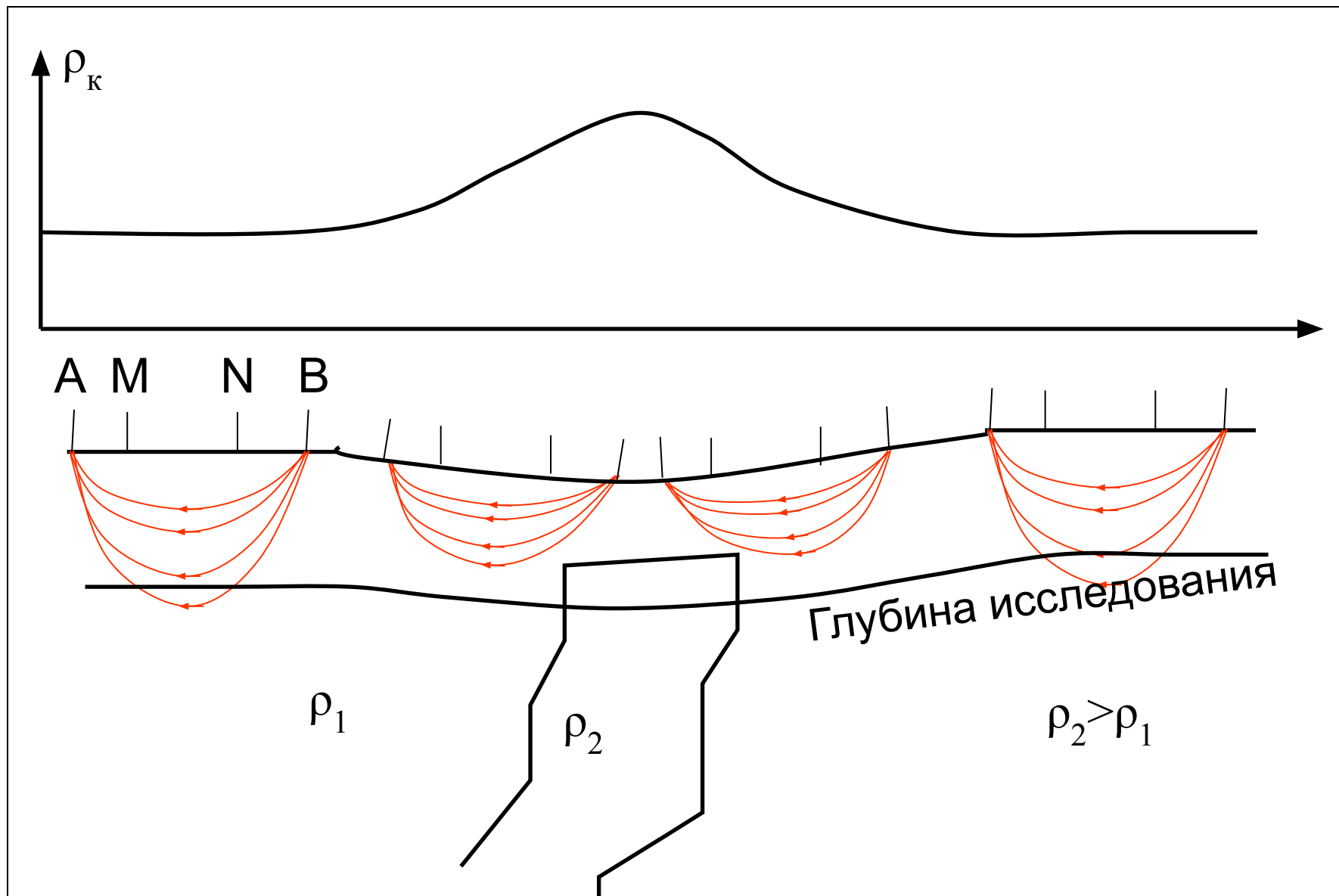


Установки: а – Шлюмберже, б – Веннера, в –
— трехэлектродная, г – дипольная, д –
срединного градиента

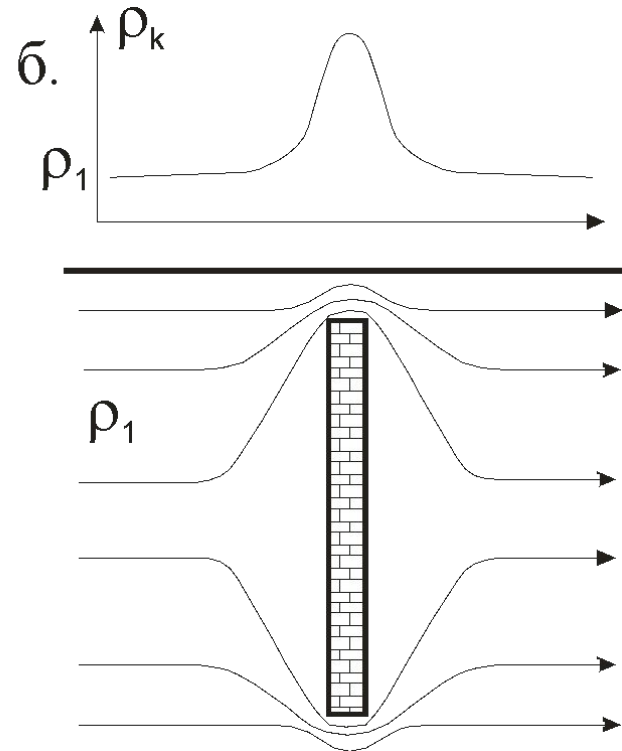
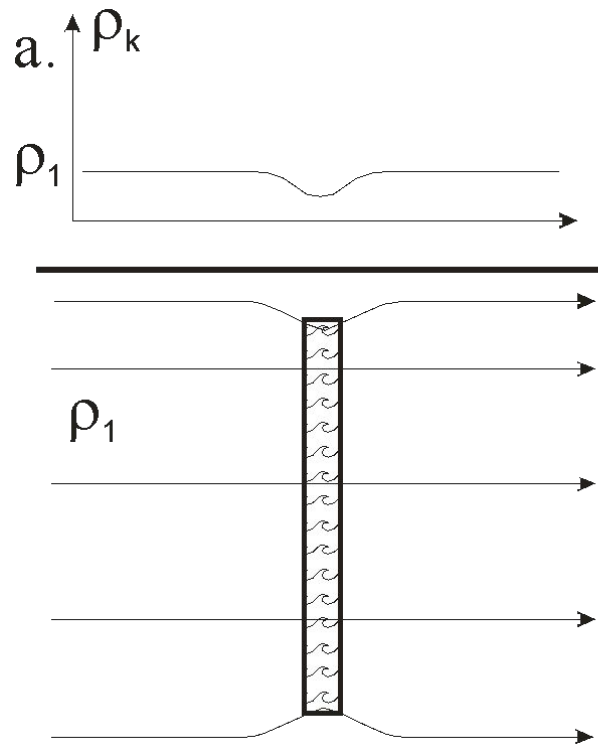


Расстояние между приемными и токовыми элементами установки позволяет изменять глубину исследования!

Симметричное профилирование над телом высокого удельного сопротивления

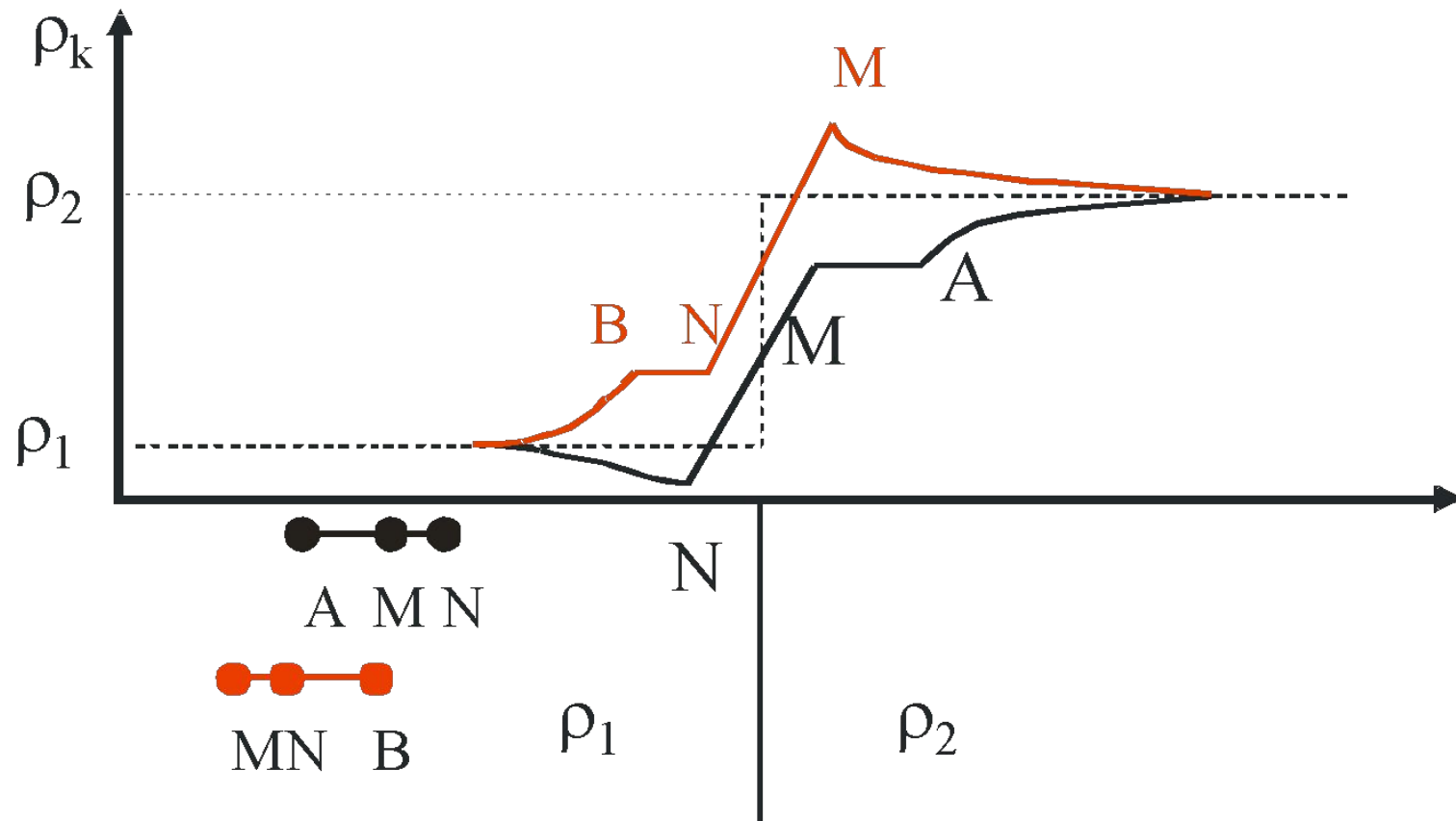


Не все установки одинаково эффективны: так, если поле горизонтально, изоляторы хорошо видны, а проводники – нет!

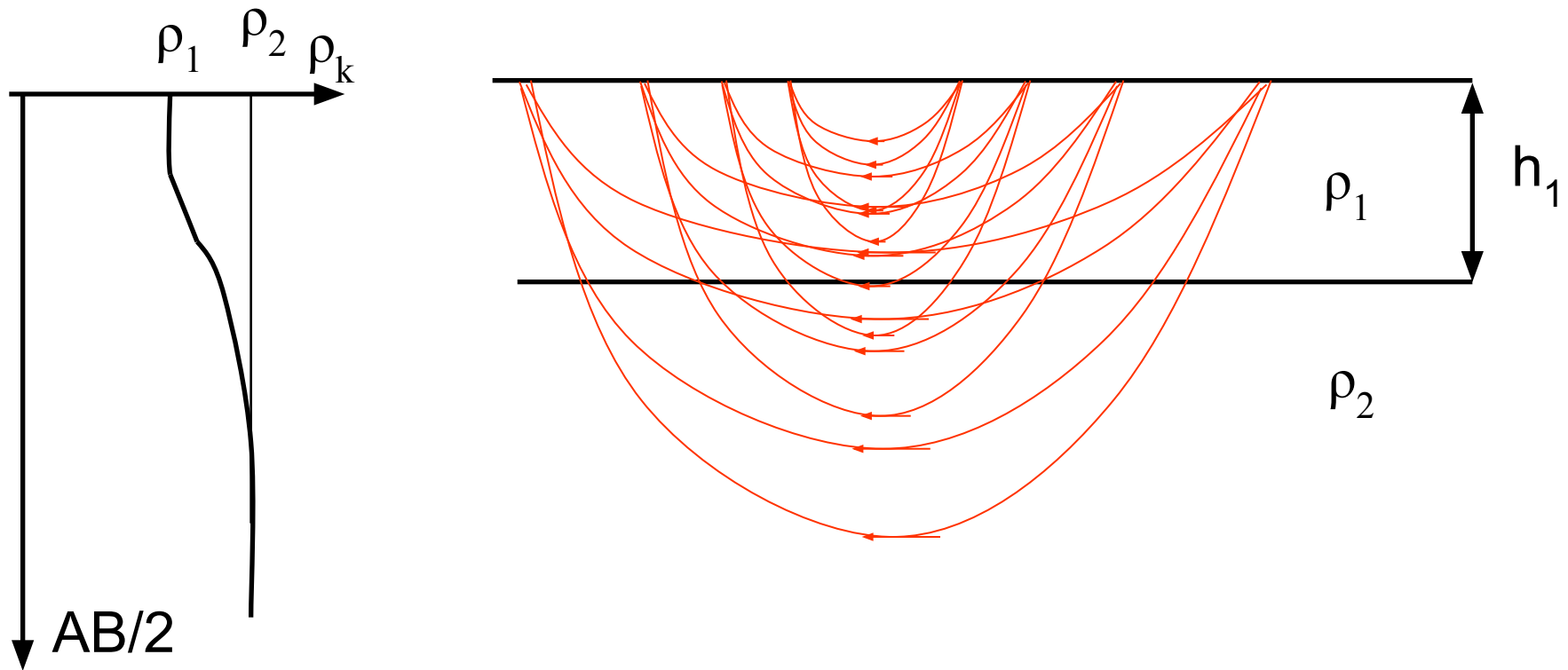


ТОК РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ ПО ПУТИ НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ!

Электропрофилирование над контактом пород

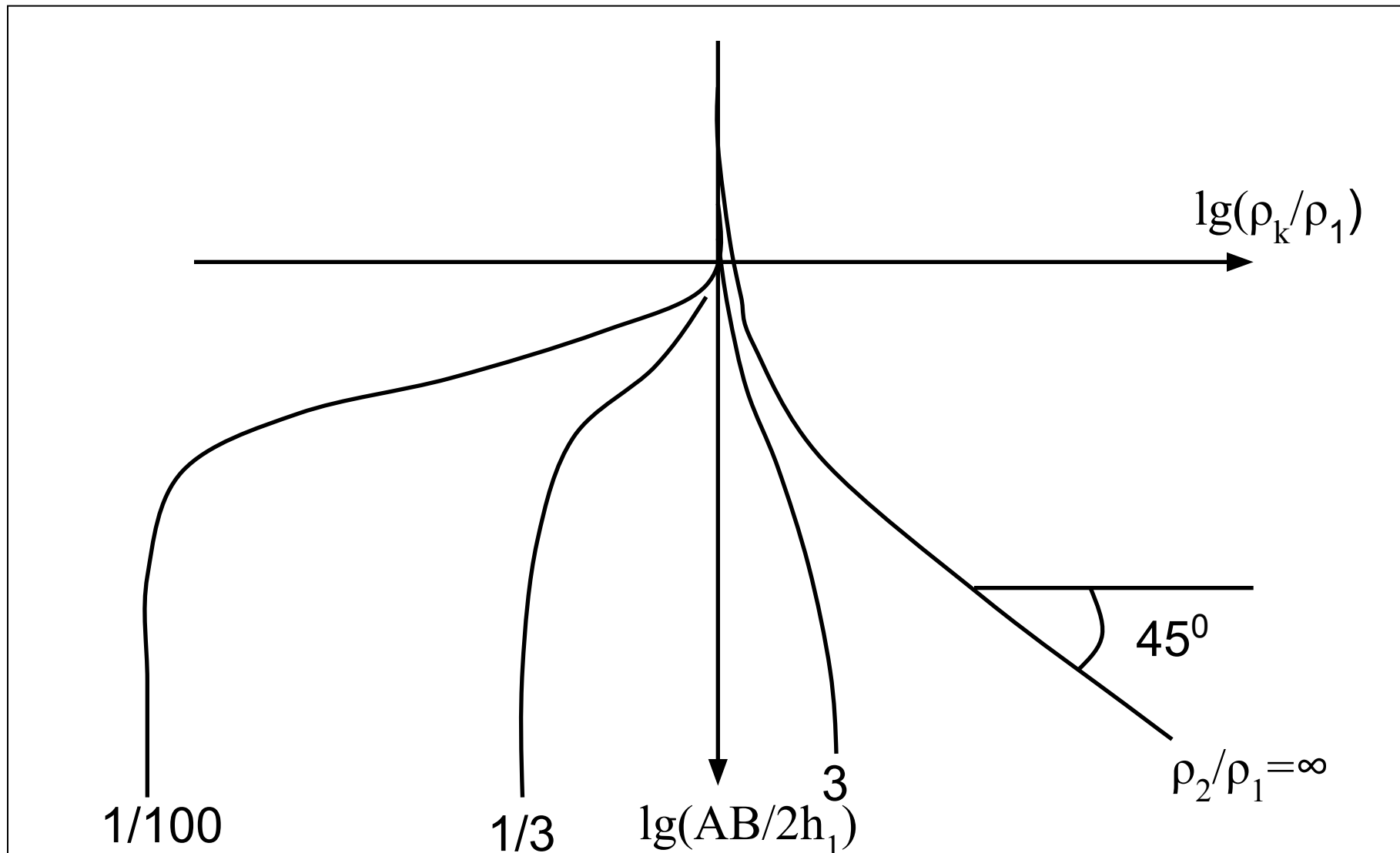


7.2.2 Электрическое зондирование

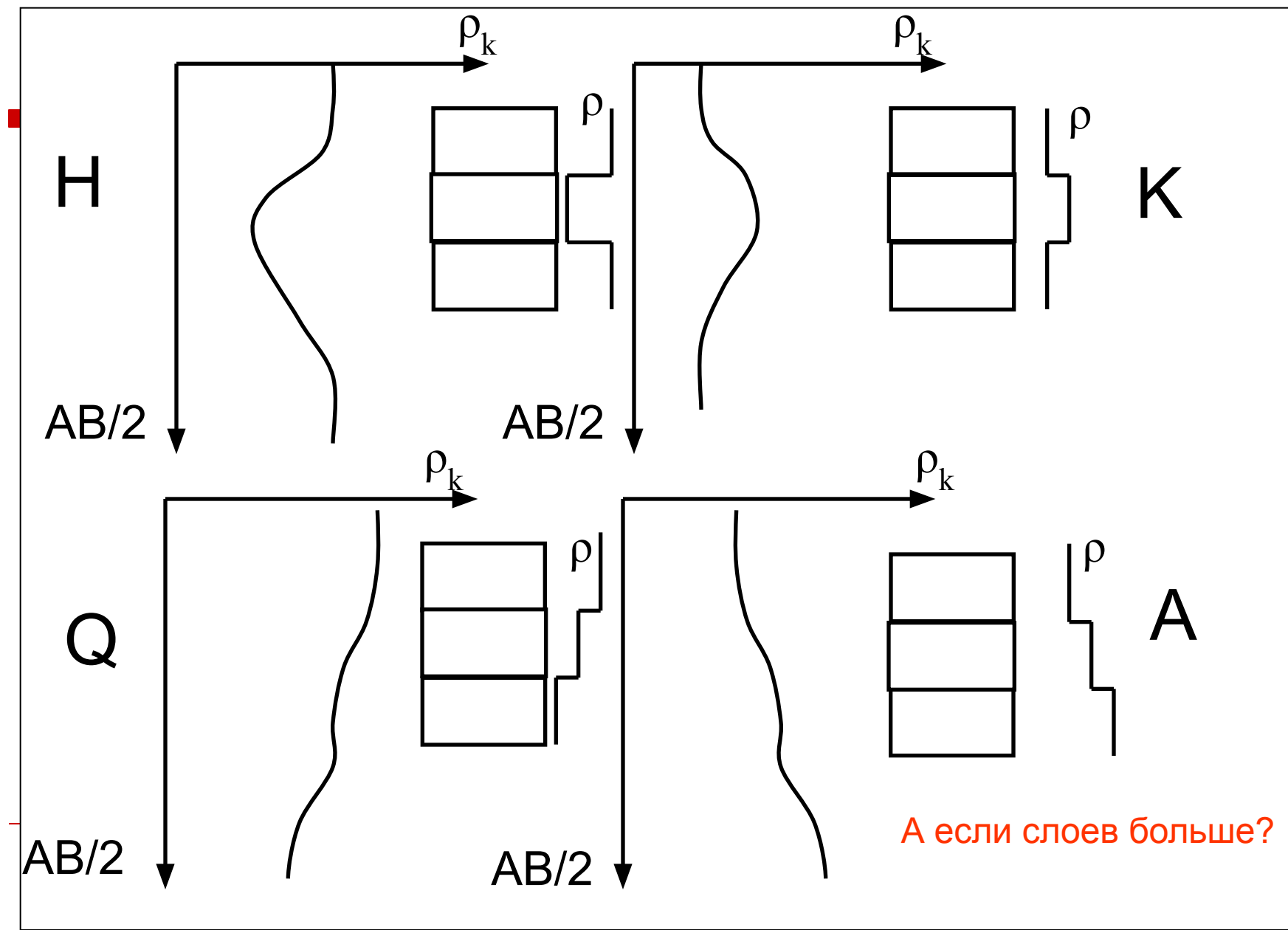


-
- Электрическое зондирование используют для изучения слоистых сред. При этом глубина исследования изменяется за счёт изменения расстояния между приёмными и питающими элементами установки.
-

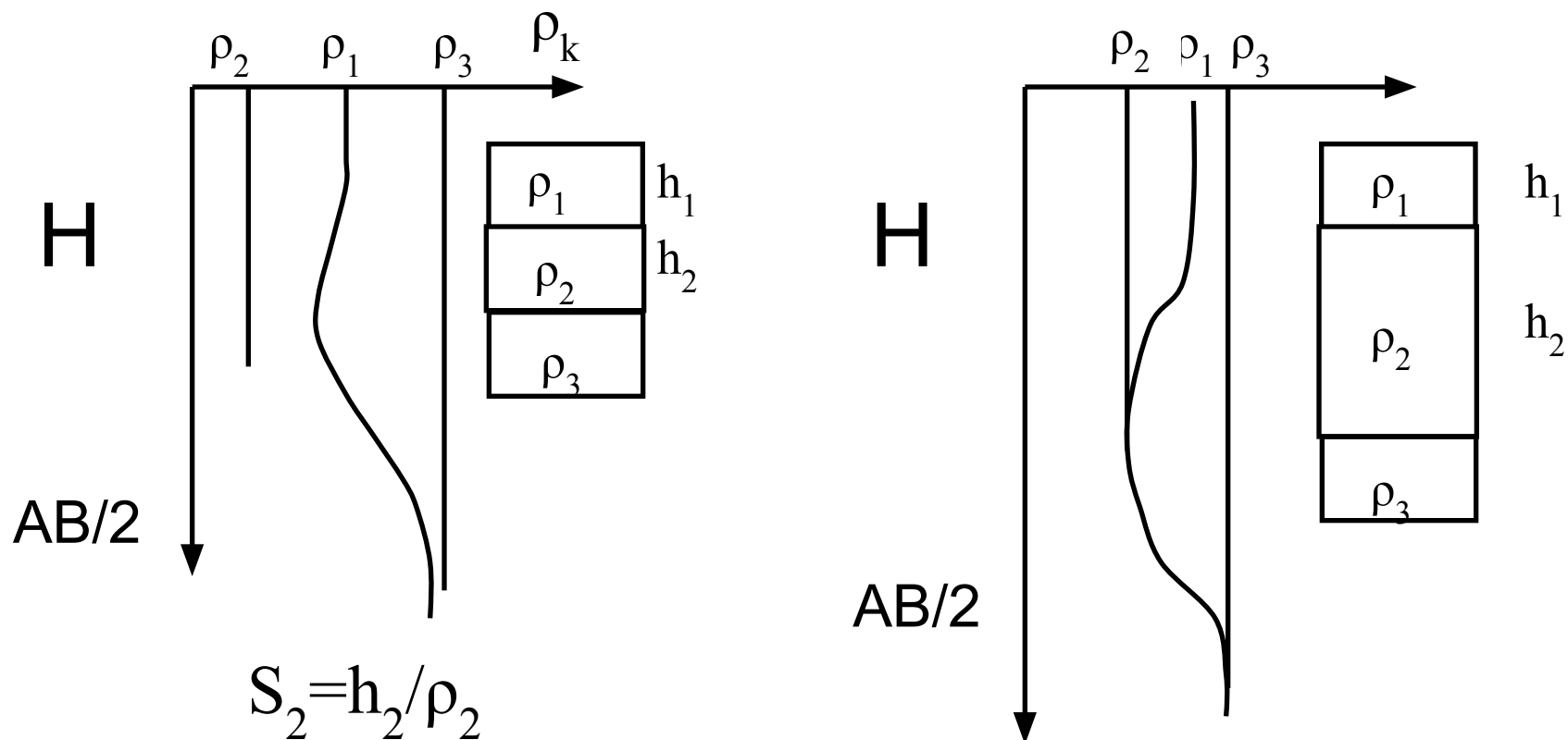
Двухслойная среда

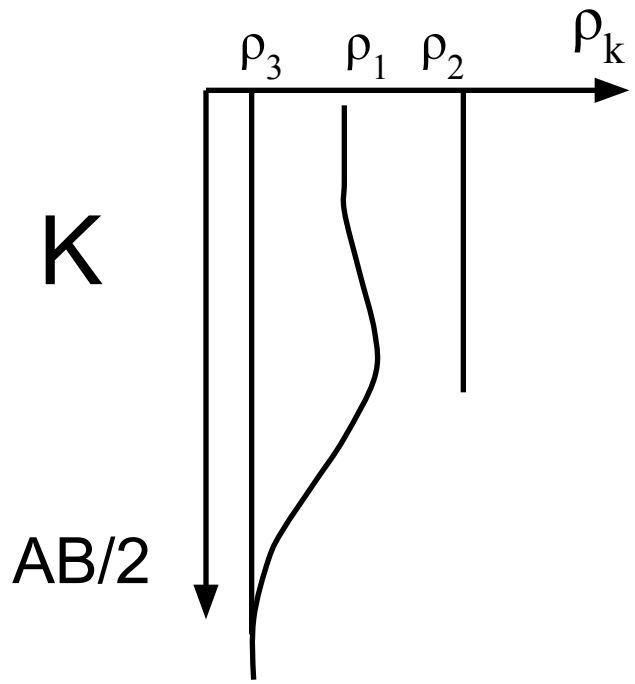


Трехслойная среда

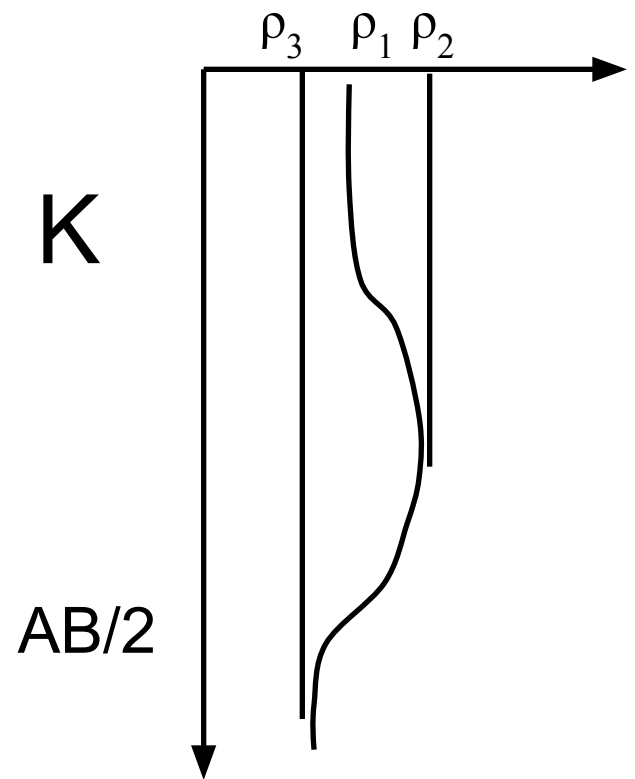


6.2.6 Эквивалентность кривых ВЭЗ

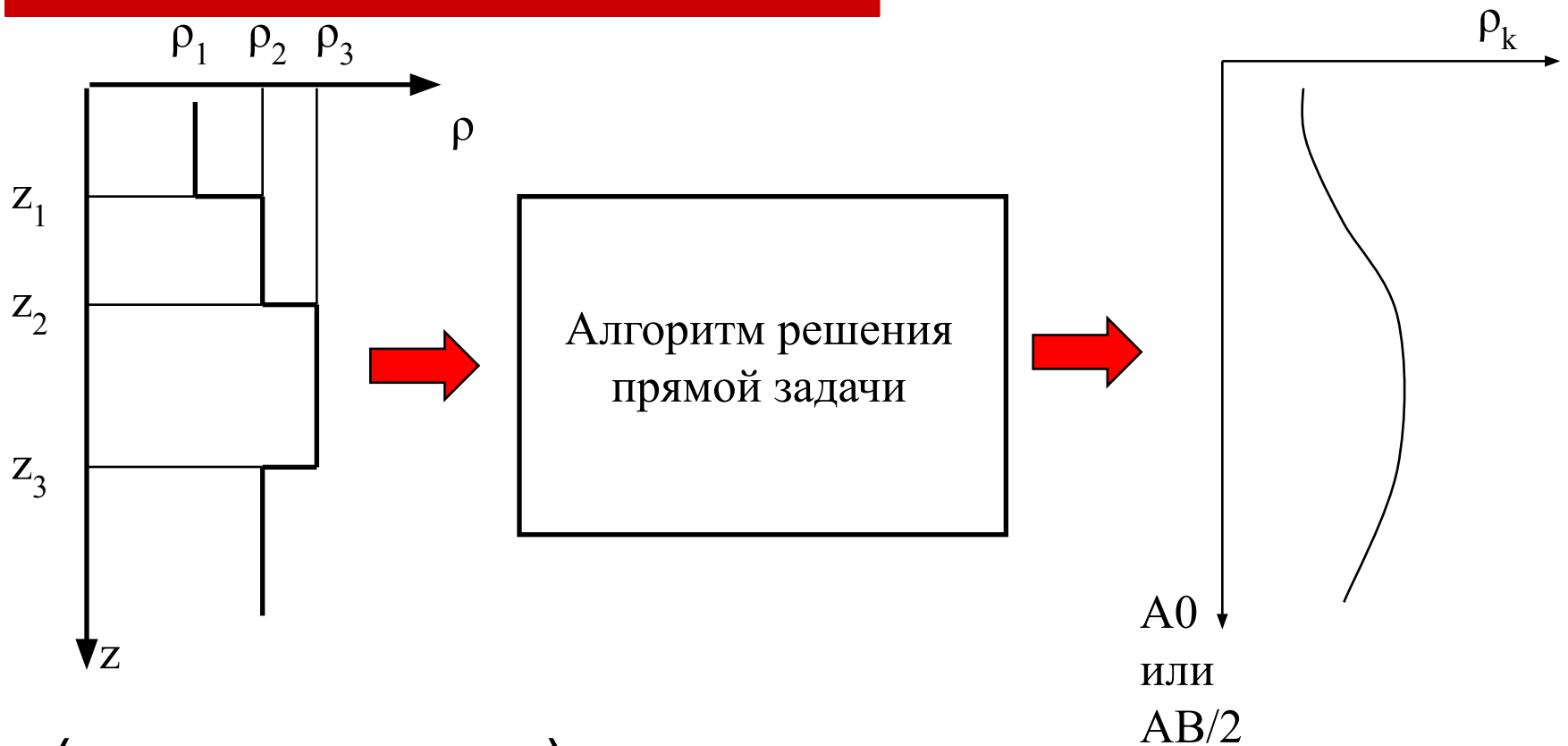




$$T_2 = h_2 \rho_2$$



Вычисление кривых ВЭЗ (прямая задача)



$$\mathbf{p} = (\rho_1 \rho_2 \rho_3 \rho_4 \dots z_1 z_2 z_3 \dots)$$

Принцип автоматической интерпретации

$$|\mathbf{p}_k^u - \mathbf{p}_k^e| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln \rho_{ki}^u - \ln \rho_{ki}^e)^2}{N}}$$

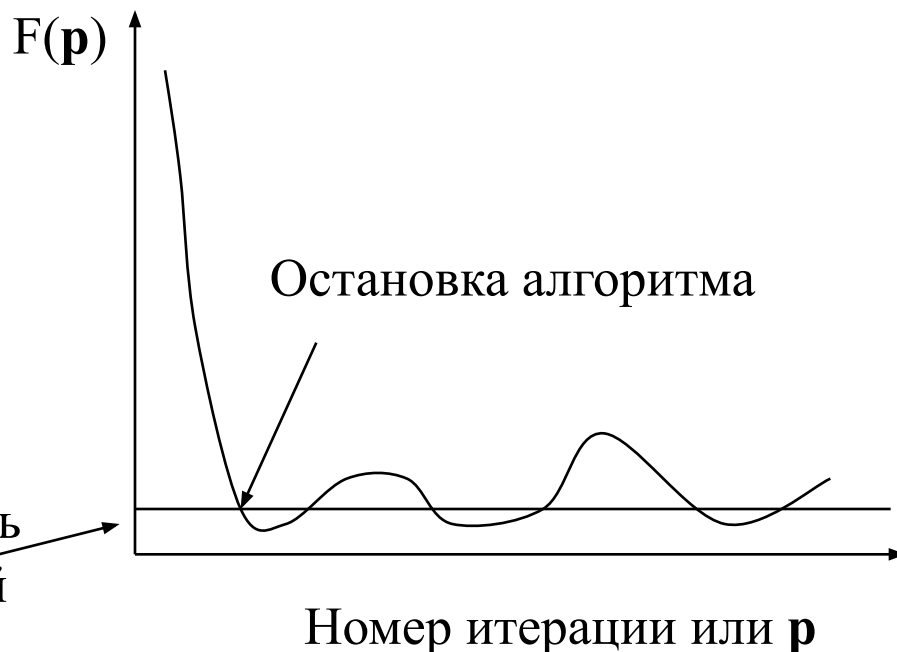
Мера уклонения наблюдаемых и вычисленных значений

$$F(\mathbf{p}) = |\mathbf{p}_k^u - \mathbf{p}_k^e| + \alpha |\mathbf{p} - \mathbf{p}_0| \rightarrow \min$$

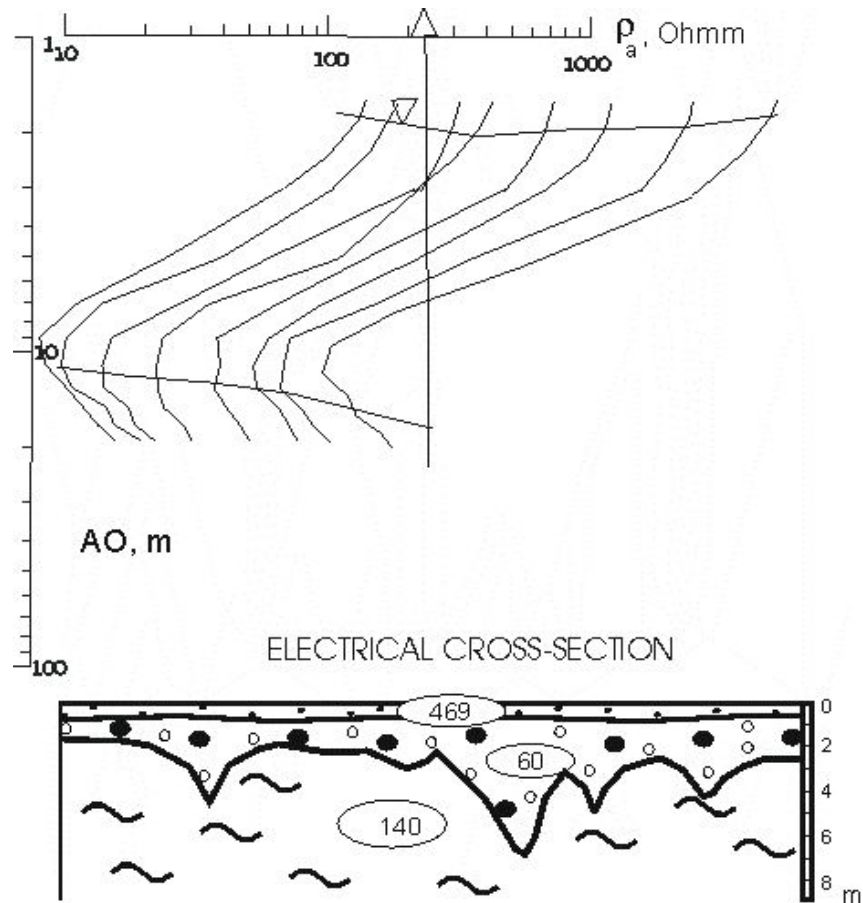
Функционал
невязки

Стабилизирующий
функционал

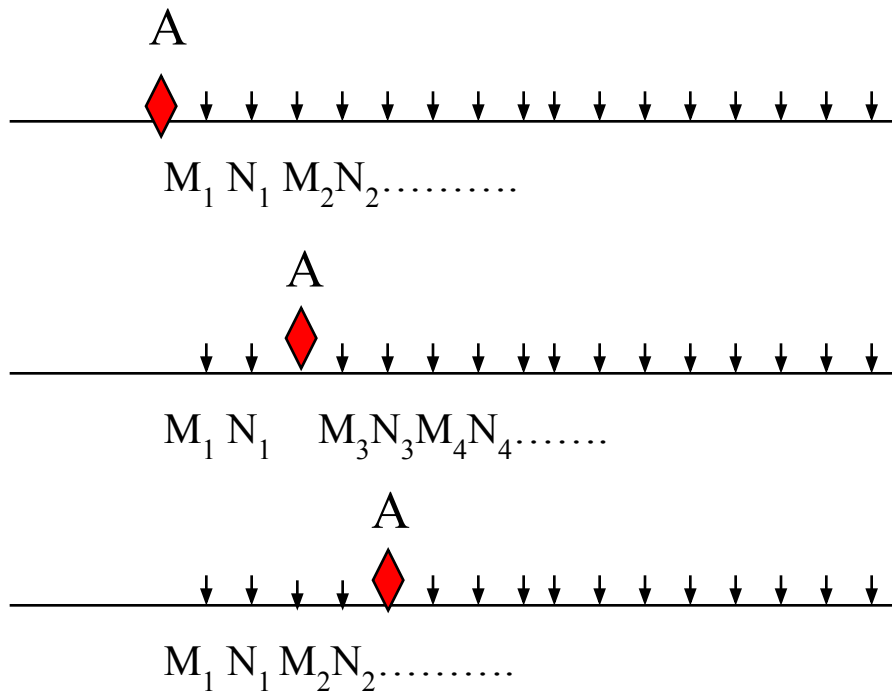
Погрешность
наблюдений



Пример результатов ВЭЗ

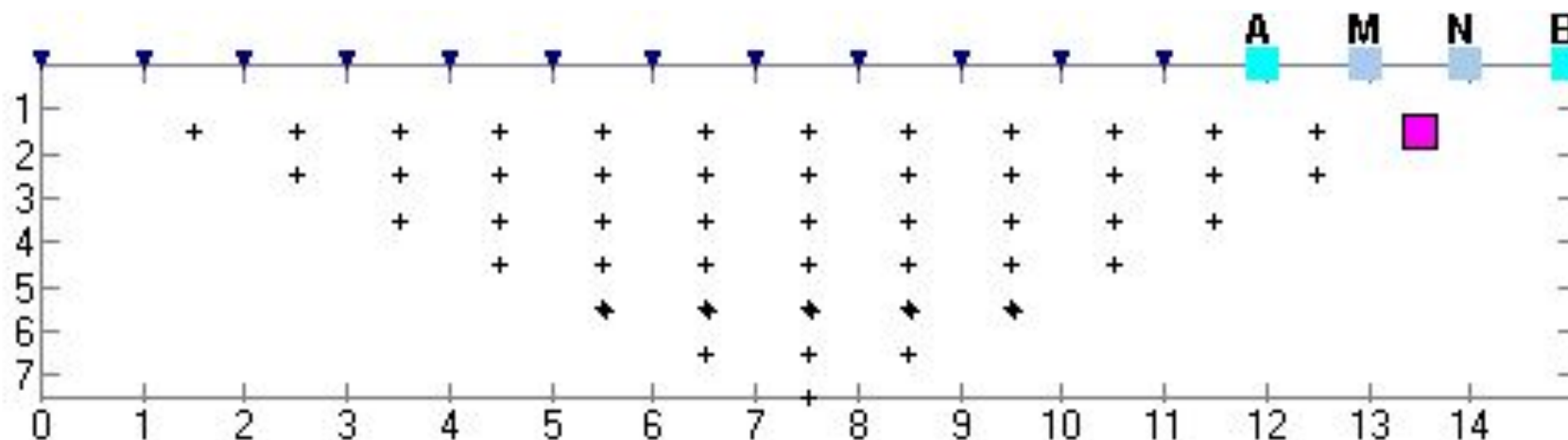


7.2.3 Электрическая томография



Измерять поле во многих местах при фиксированном положении источника, затем, - перемещать источник и вновь многократно измерять поле. “Подсвечивать неоднородности при разном положении фонарика”

Реализация на основе установок Веннера-Шлюмберже



Многоканальная м



Движущая наземная установка

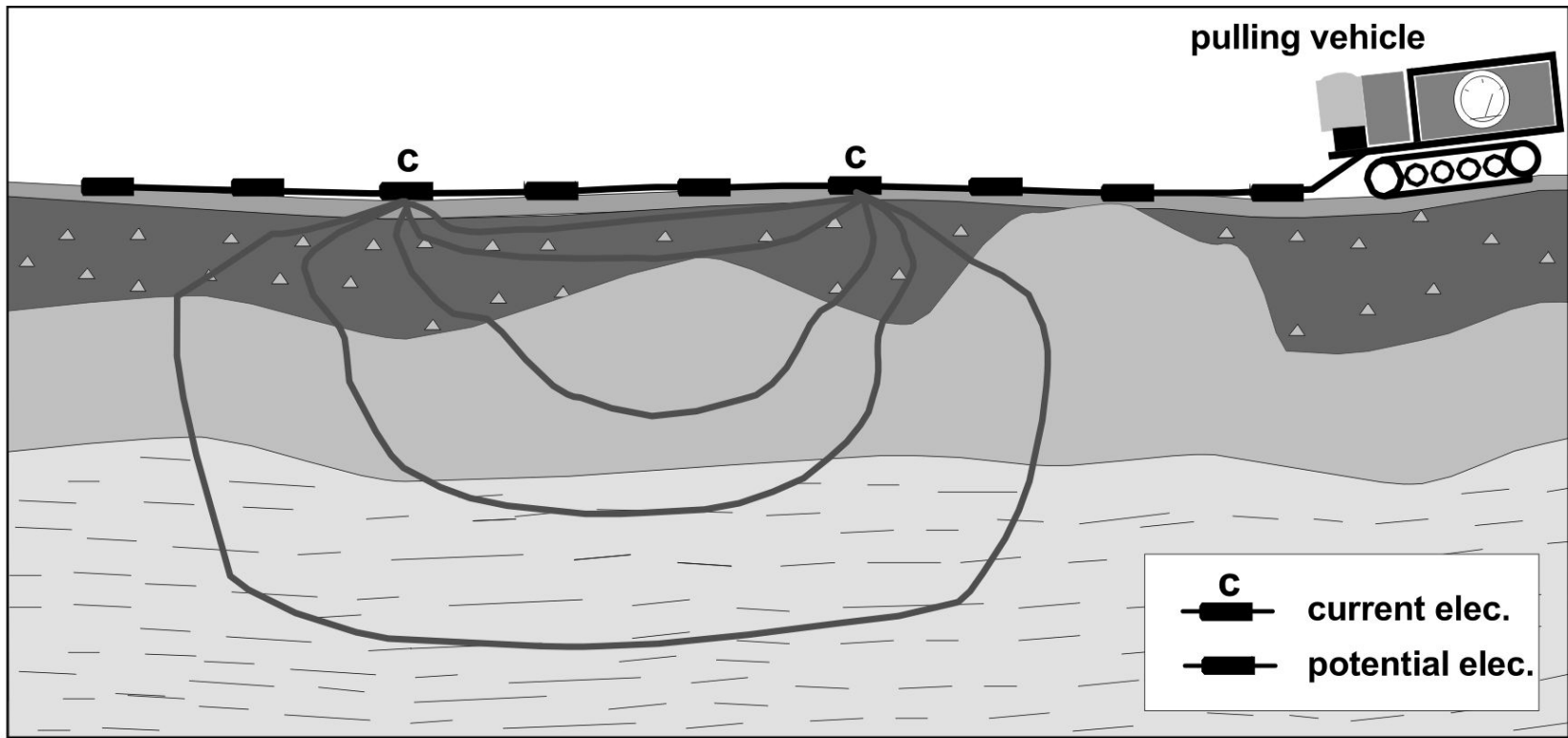


Figure 2.4. The Aarhus Pulled Array System. The system shown has two current (C) electrodes and six potential electrodes (Christensen and Sørensen 1998, Bernstone and Dahlin 1999).

Установка на акватории

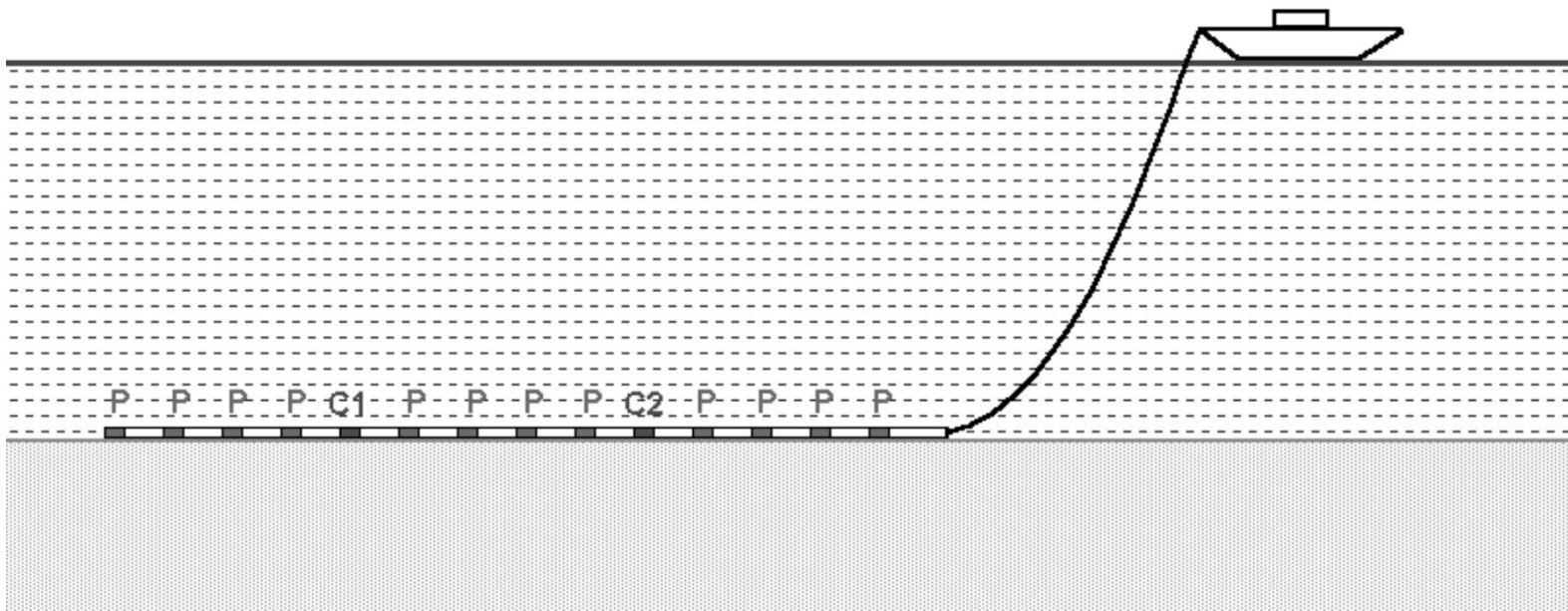
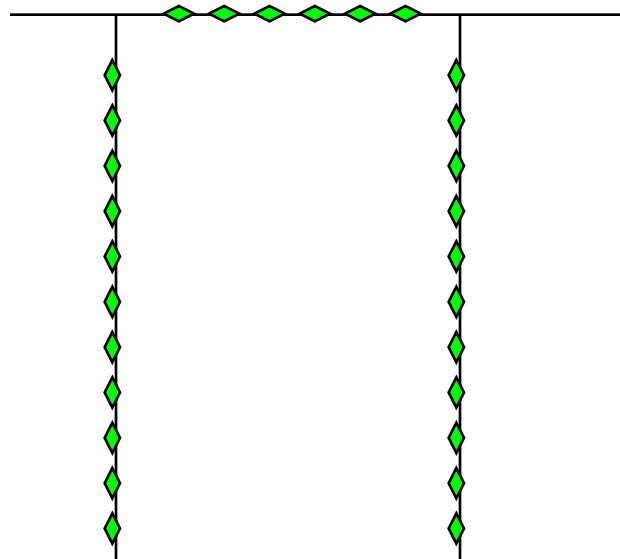


Figure 2.6. Schematic diagram of a possible mobile underwater survey system. The cable has two fixed current electrodes and a number of potential electrodes so that measurements can be made at different spacings. The above arrangement uses the Wenner-Schlumberger type of configuration. Other configurations, such as the gradient array, can also be used.

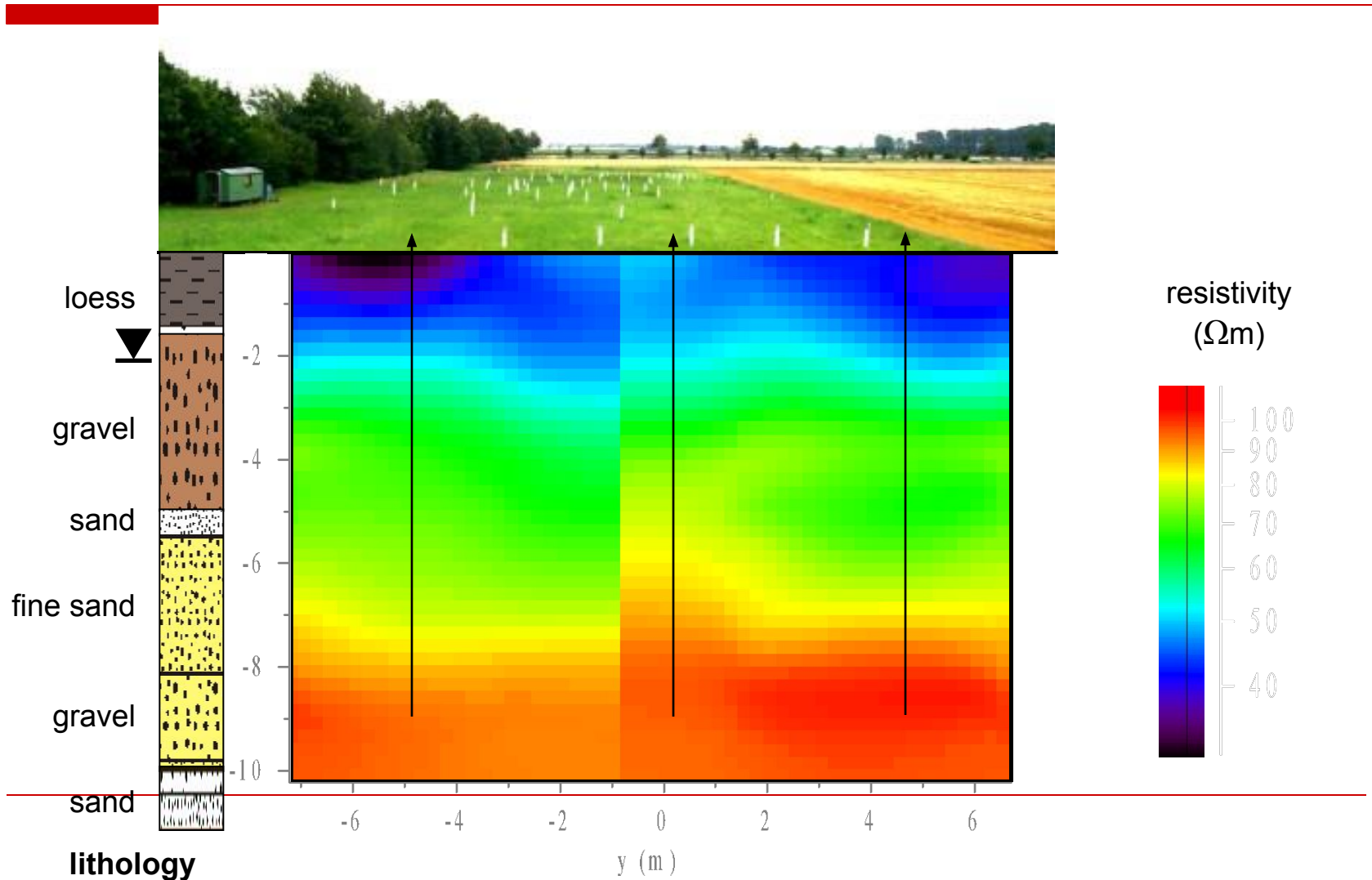
Межскважинная конфигурация



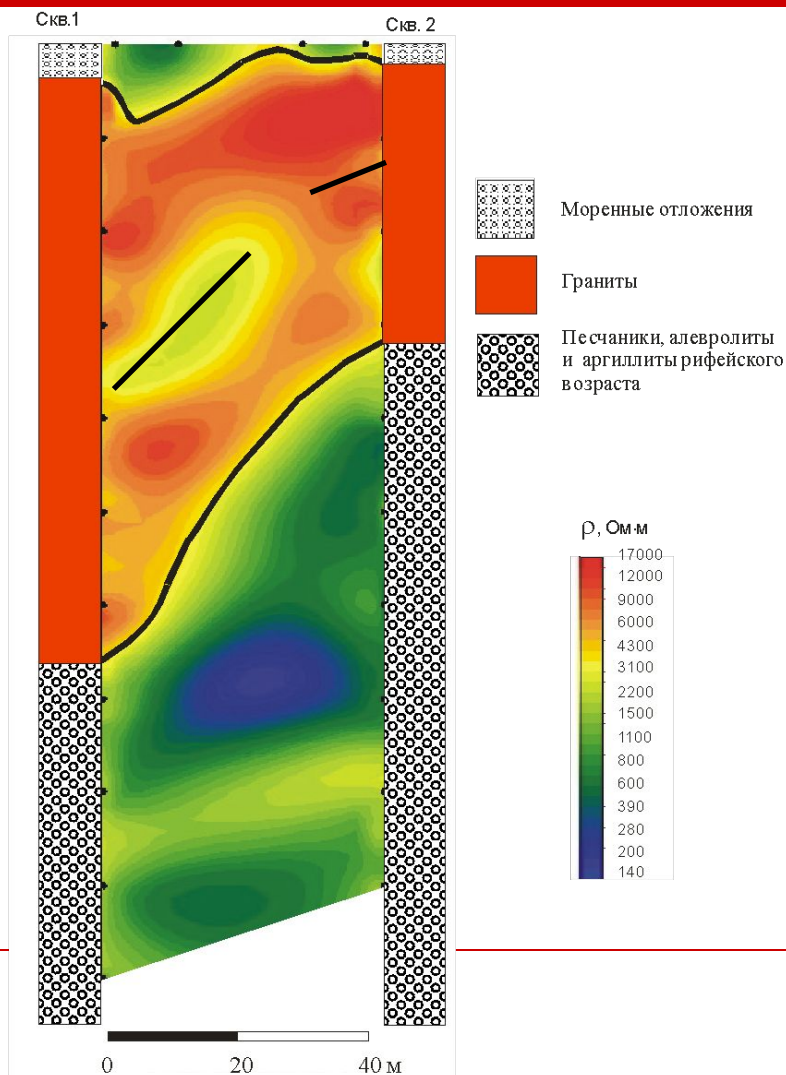
Каждая пара (например, соседних) электродов попеременно бывает как приемной, так и питающей.

Результаты высокого разрешения...

(Краутхаузен, Германия, 2003, детальное распределение литологии четвертичных отложений)



Результаты высокого разрешения... (Картирование в объеме границ и внутреннего строения интрузии, п-в Средний, РФ)



...даются дорогой ценой!

