

Типы поляризационных эффектов,  
происходящих в породах и их  
проявления в различных геофизических  
методах

Задорожная В. Ю.

ИРНИТУ, институт «Сибирская школа геонаук»,

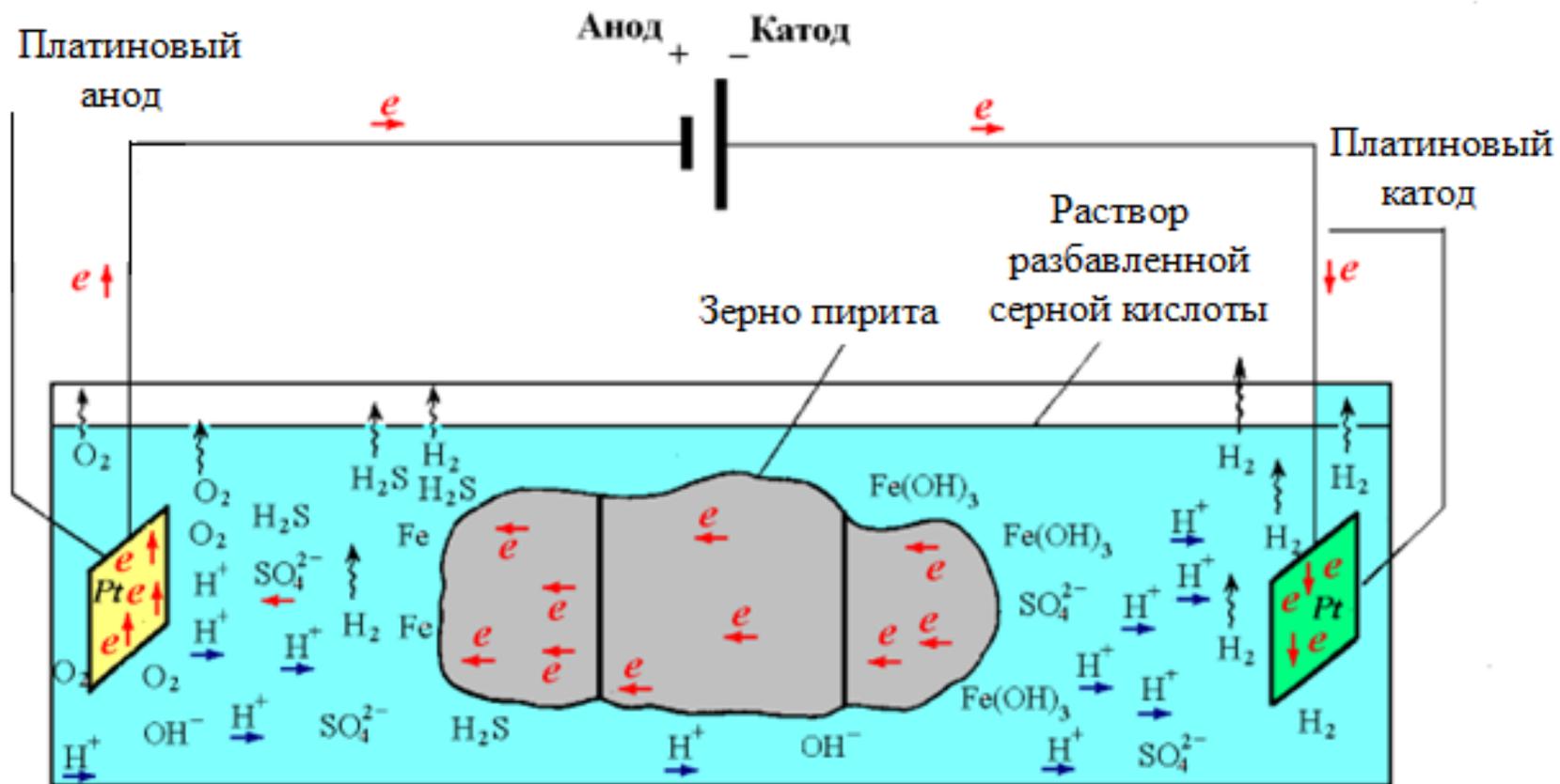
## Медленные виды поляризации

- Время установления этих видов поляризации сравнимо с частотой используемых электромагнитных полей, поэтому они называются медленными по сравнению с электронными и ионными видами медленными.
- В зависимости от состава пород проявляется разный механизм ВП. Различают следующие виды медленной поляризации:
  - *Гальваническая поляризация* в породах с содержанием минералов с электронной проводимостью (магнетит, пирит, халькопирит, угли и др.).
  - *Электроосмотическая поляризация* возникновение эффекта ВП обычно связывается с энергетическими затратами на изменение двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности зерна и электролиз поровой влаги. Вторичные токи, образующиеся при таком механизме ВП, сопоставимы с первичным током по амплитуде;

– *Мембранная поляризация* возникает при в породах, в которых присутствует резкое изменение сечения поровых каналов. При перетекании ионопроводящего раствора через контакт капилляров возникает локальное изменение его концентрации на границах с резким сечением поровых каналов, которое и вызывает поляризацию. Эффект поляризации в таких породах гораздо меньше.

– *Миграционный* тип – возникает в породах, содержащих рассеянные одиночные поры и зерна металлов. Эти поры и зерна способны заряжаться под действием наложенного магнитного поля.

# 1. Электролитическая поляризация



- Электролитическая поляризация  $\vec{P}_{эл}$  возникает совместно с концентрационно-диффузионной при прохождении электрического тока через электронно-ионно-проводящие породы (графит, угли, сульфидные и железистые, и другие руды).

- До пропускания тока электронно-проводящие компоненты и электролит непрерывно обмениваются ионами (или электронами) - проходит ток обмена, и вследствие избирательной адсорбции возникает ДЭС.
- Если к электронно-ионно-проводящей породе приложено постоянно возрастающее напряжение, то в результате перезарядки двойного электрического слоя и электролиза стационарные потенциалы с анодной и катодной сторон электронно-проводящих включений неодинаково изменяются, они становятся диполями.
- На аноде зерна пирита (сторона, обращенная к платиновому катоду) идет реакция окисления:  

$$4\text{FeS}_2 + 44\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_2 + 16\text{H}^+ + 8\text{SO}_4^{2-} + 60\text{H}^+ + 60\text{e}^-$$

$$\text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ адсорбируется на аноде пирита}$$
- На катод зерна пирита происходят следующие реакции:  $15\text{FeS}_2 + 60\text{H}^+ + 60\text{e}^- \rightarrow 15\text{Fe} + 30\text{H}_2\text{S}$  и  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ .

Таким образом разом, происходят необратимые реакции, то есть возможна неповторяемость зарегистрированных сигналов при геофизических измерениях.

Активационное перенапряжение (поляризация) разряда устанавливается за 10-50 мс после приложения поля, а время релаксации перенапряжения адсорбции 100 – 200 мс, а концентрационный поляризации от единиц секунд до несколько минут.

- Такие типы поляризации возможно обнаружить только методами ВП.
- Данфй тип поляризации никакими формулами Cole-Cole не аппроксимируются!!!

## 2. Электрокинетические явления

- При распространении электромагнитного поля в земле возникают электрические токи, по действием которых жидкость в порах начинает передвигаться относительно твердой фазы, и, как мы отмечали ранее, при движении жидкости в капилляре свободные ионы увлекаются потоком, вследствие чего их концентрация по направлению течения возрастает, а в противоположном направлении убывает, то есть возникает электроосмотический эффект. Тот же эффект наблюдается, если к концам поры

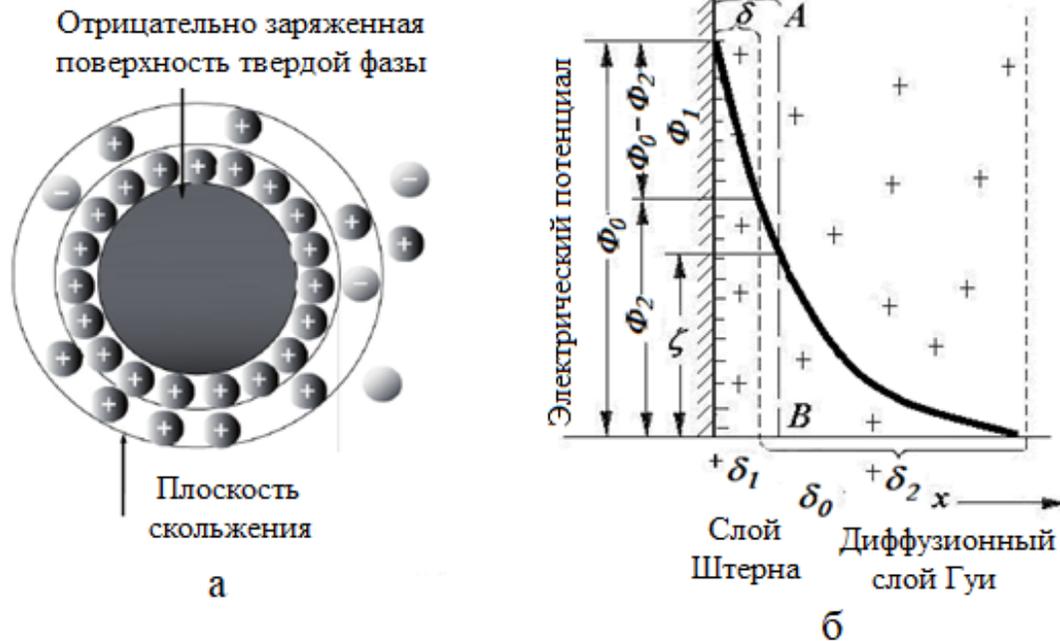


Схема строения двойного электрического слоя и падения потенциала в нем.

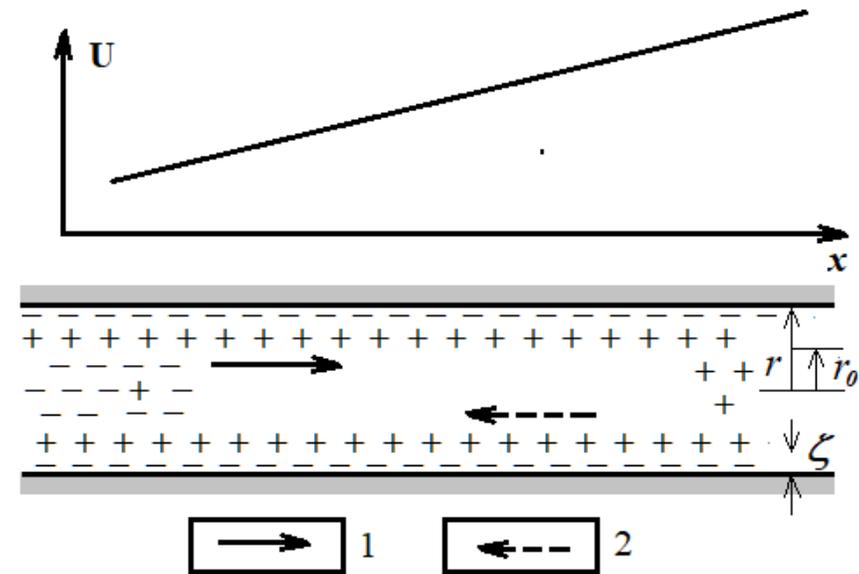


Схема образования фильтрационного потенциала и график изменения потенциала  $U$  вдоль течения подземных вод. 1 – направление скорости потока, 2 – направление эдс фильтрации

Классическая формула Гельмгольца-Смолуховского для потенциалов течения имеет вид:

$$E = \frac{\varepsilon_{\text{отн}} \varepsilon_0 \zeta}{4\pi \sigma_{\text{ж}} \nu_{\text{д}}} \text{grad } P, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{ж}}$  - удельная электропроводность флюида в поре,  $\varepsilon_{\text{отн}}$  - диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\nu_{\text{д}}$  - динамическая вязкость жидкости,  $E$  - напряженность электрического поля,  $\text{grad}P$  ( $\Delta P$ ) — разность потенциалов на концах капилляра.

Формула Гельмгольца-Смолуховского для электроосмоса имеет вид:

$$\nu_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_{\text{отн}} \varepsilon_0 \zeta}{4\pi \sigma_{\text{ж}} \nu_{\text{д}}} I, \quad (2)$$

где  $I$  – сила приложенного тока,  $\nu_{\text{д}}$  – возникшая объемная скорость движения жидкости под действием приложенного тока или *versa vis*.

Саксоном показано, что (Григоров, 1972):

$$\frac{\text{grad}P \cdot \nu_{\text{д}}}{I \cdot E} = 1$$

# Cole-Cole формула

- Существуют многочисленные формулы, предназначенные описать процессы вызванной поляризации в геологических средах поляризации в геологических средах. Практически все формулы базируются на эквивалентных электрических схемах, включающих набор сопротивлений (резисторов) и конденсаторов (Dias, 2002). Наиболее паста используемой формулой является формула Cole-Cole (Pelton et al., 1978):

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{\left[1 + \frac{\eta}{1 + (i\omega\tau)^c}\right]}, \quad (3)$$

где  $\eta$  поляризуемость и  $\tau$  - постоянная спада вызванной поляризации,  $c$  — показатель степени, которая отображает время, на котором проявляется эффекты вызванной поляризации.

Приняв  $c = 1$ , во временной области выражение (3) будет иметь вид:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{1+\eta} \left[ 1 - \eta \exp\left(-\frac{1+\eta}{\tau} t\right) \right], \quad (4)$$

## Параметры, характеризующие потенциалы течения

$$\sigma_{\chi} = \sigma_0 / (1 + \eta), \text{ и } \eta = \sigma_{\Delta} / \sigma_{\chi}. \quad (5)$$

Это означает, что  $\eta$  это отношение избытка электропроводности  $\sigma_{\Delta}$  (то есть поверхностной проводимости) к удельной электропроводности электролита в порах (подвижных ионов)  $\sigma_{\chi}$ . Очевидно, что величина  $\eta$  может изменяться с 0 (когда влиянием поверхностной проводимости (двойных электрических слоев) можно пренебречь), то есть в широких порах до единицы, когда ровно половина ионов (катионы) адсорбируются ДЭС и вторая половина (анионы) составляют подвижную часть в электролите.

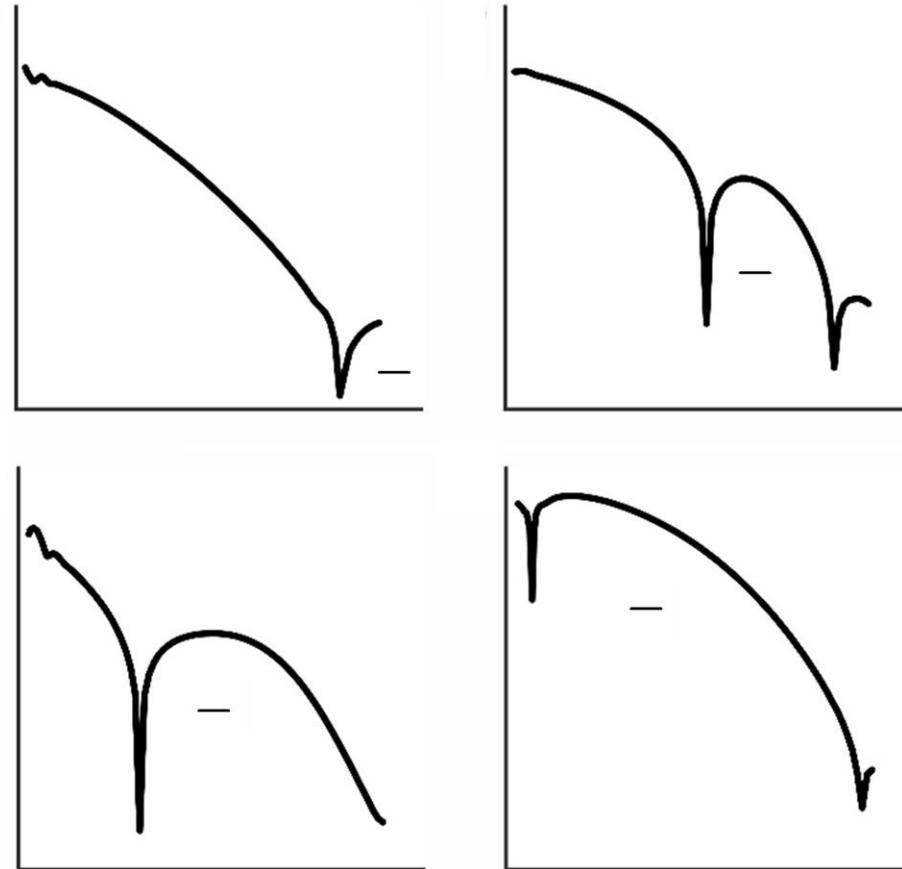
- Опуская громоздкие формулы приведем окончательное выражение для постоянной спада ВП в одиночной поре (Hallbauer-Zadorozhnaya, Bessonov, 2002):

$$\tau \sim \frac{(1 + \eta)r_1^2}{5.76\nu_k} \quad (6)$$

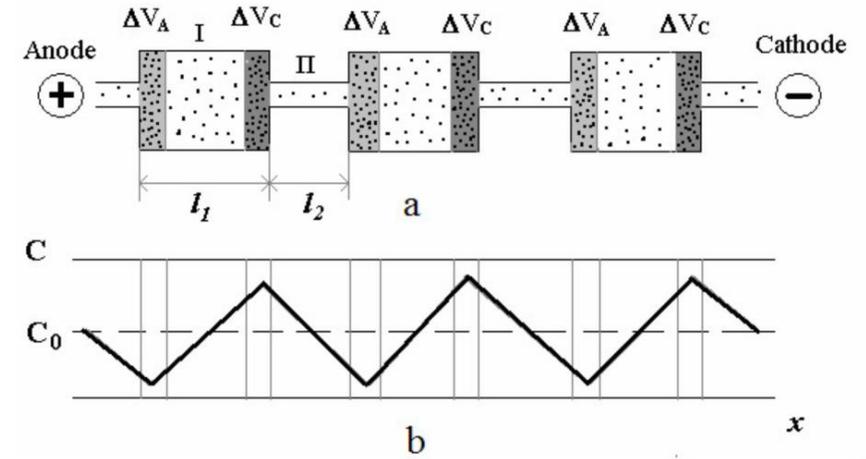
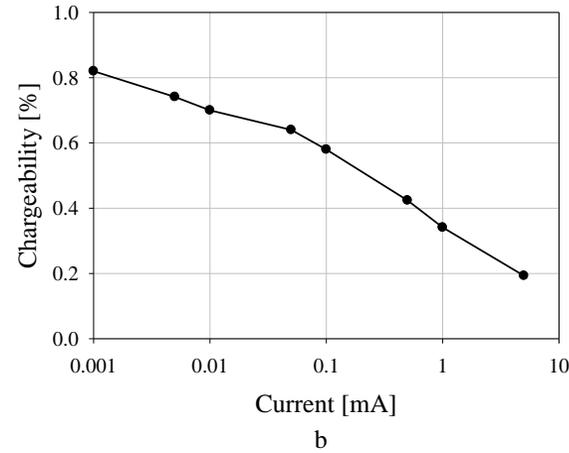
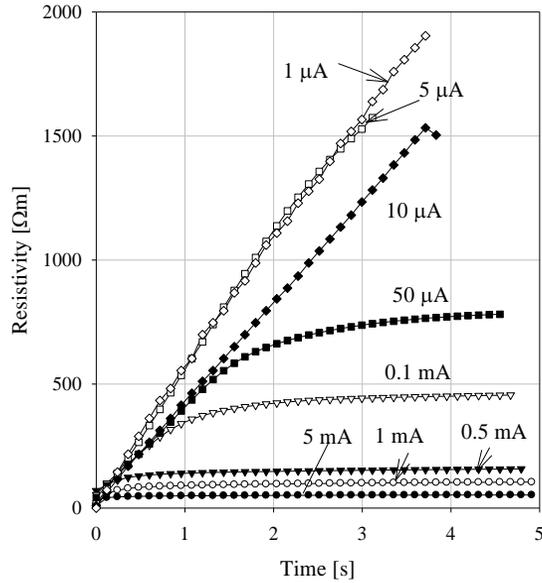
- где  $r_1$  – радиус пор (в м),  $\nu_k$  – кинематическая вязкость жидкости (в м<sup>2</sup>/с).

# Параметры, характеризующие потенциалы течения

- Обусловленный двойными электрическими слоями потенциалы течения (и электроосмос) сопровождает все остальные виды поляризации. **Время релаксации оставляет  $1e-6$  -  $1e-3$  с и более.** Однако, наиболее подверженным влиянию электроосмотической поляризации является метод становления поля в ближней зоне (ЗСБ), поскольку время релаксации и время становления вторичного электромагнитного поля, обусловленного ступенчатым выключением электрического тока в петле вполне сопоставимы.

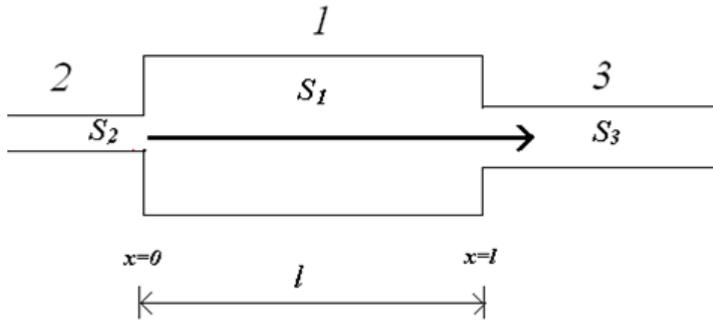


# Мембранная поляризация



Мембранная поляризация, возникающая в породах при резкой смене поровых каналов (по Кобрановой В.П.)

а  
Расчетное сопротивление образца кимберлитов СР09012АА для разной амплитуды тока (а) и измеренная поляризация (б).



Уравнение диффузии и граничные условия

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (7)$$

где  $u$  – концентрация раствора,  $a^2 = D$  - коэффициент диффузии.

Запишем граничные и начальные условия в виде:

Модель

$$u|x=0 = \psi_2(t), u|x=l = \psi_3(t) \text{ и } u|t=0 = \phi(t), \quad (9)$$

где  $\psi_2(t)$ ,  $\psi_3(t)$  и  $\phi(x)$  - заданные функции.

Воспользуемся готовым решением, приведенным у Кошлякова (1972) Общее решение уравнения (7) с граничными и начальным условием (8) имеет вид:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (9)$$

где  $x$  – точка наблюдения вдоль поры,

$$T_n(t) = \exp(-At) \left[ C_n + \frac{2n\pi a^2}{l^2} \int_0^t \exp(A\tau) \cdot [\psi_2(\tau) - (-1)^n \psi_3(\tau)] d\tau \right], \quad (10)$$

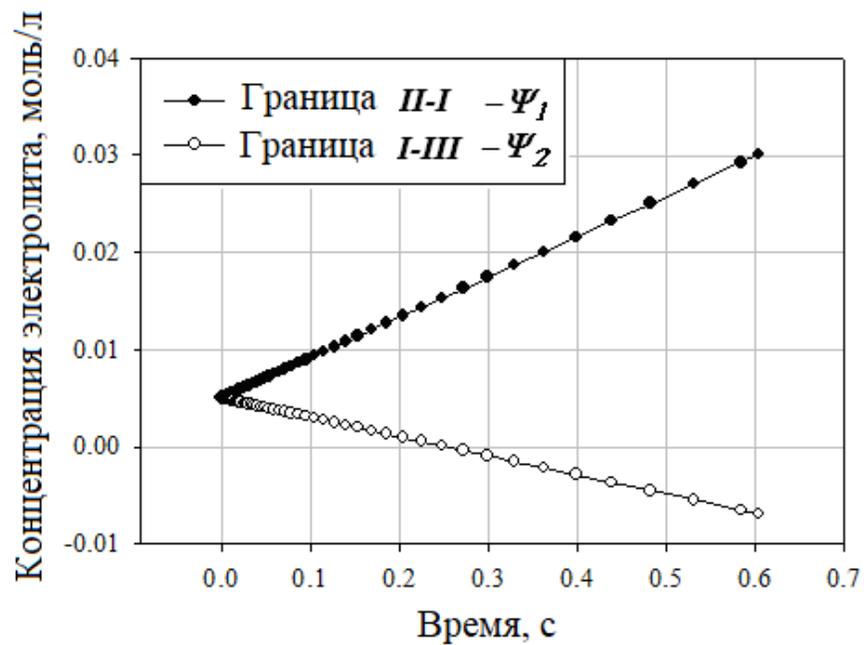
где

$$A = \left( \frac{n\pi a}{l} \right)^2 \quad C_n = T_n(0) = \int_0^l \phi(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dl, \quad (7)$$

Общее количество перенесенного вещества  $m$  в растворе при наложении электрического поля определяется законом Фарадея (1).

$$u_{\Delta a2}(t) = \frac{I^2 M_k t}{F Z_k D_k S_1 S_2 \sigma_k} (n_{k2} - n_{k1}) \quad u_{\Delta k3}(t) = \frac{I^2 M_k t}{F Z_k D_k S_1 S_3 \sigma_k} (n_{k1} - n_{k3}),$$

$$u_{\Delta a2}(t) = \frac{I^2 M_a t}{F Z_a D_a S_1 S_2 \sigma_a} (n_{a1} - n_{a2}), \quad u_{\Delta a3}(t) = \frac{I^2 M_k t}{F Z_a D_a S_1 S_3 \sigma_a} (n_{a3} - n_{a1}). \quad (11)$$



Линейные граничные условия, рассчитанные для левой и правой стороны основной поры  $I$  при включении тока

С другой стороны, процесс перераспределения концентрации короче при больших значениях разности чисел переноса. Таким образом, в рассматриваемой задаче граничные условия (11) действуют только до времени  $t_0$ , после чего возникает разрыв в электрической цепи, и концентрация на контакте пор становится постоянной. При больших токах блокировка пор происходит на более ранних временах, скорость установления концентрации максимальна, разность потенциалов скорее достигает своего асимптотического значения. Именно поэтому форма кривых ВП близка к ступенчатой функции. В предельном случае электрический ток течет только по оставшимся неблокированным порам, и именно эти каналы определяют электрическое сопротивление пород, регистрируемое методами постоянного тока. Если величина приложенного тока уменьшается, все большее и большее число пор будет служить путеводными каналами для прохождения электрического тока до того момента, когда концентрация ионов на границах достигнет критической величины.

$t_0$  означает время, при котором наступает разрыв электрической цепи. Тогда

$$t_0 = \frac{u_{k0} F z_k D_k S_1 S_3 \sigma_k}{I^2 M_k (n_{k1} - n_{k3})}. \quad (12)$$

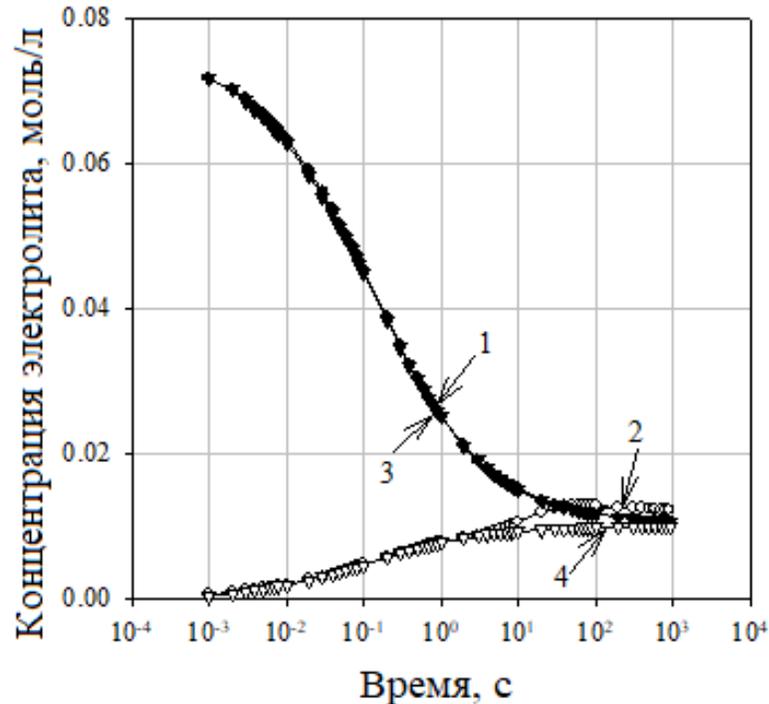
Очевидно, что при обратном направлении течения тока разрыв гальванической цепи возникнет на границе II-I. Здесь мы приходим к важному выводу: время выхода разности потенциалов, возникающей между концами капилляра, на постоянное значение контролируется разностью чисел переноса и поперечным сечением контактирующих пор

# . Мембранная поляризация, возникающая в среде

При выключении тока электрический ток больше не поступает в породу, и диффузия ионов между капиллярами выравнивается: ионы, диффундирующие из крупных пор в контактирующие с ними капилляры, а также из узких капилляров в крупные поры, при этом количества переносимых ионов различны. Эту задачу необходимо описать уравнением неоднородной диффузии:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t), \quad (13)$$

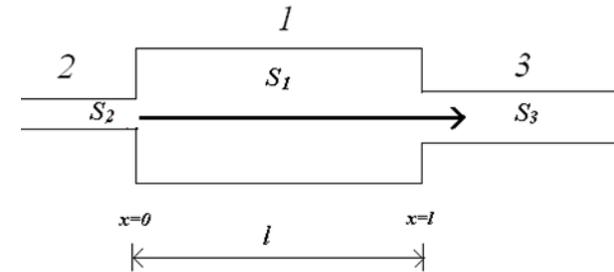
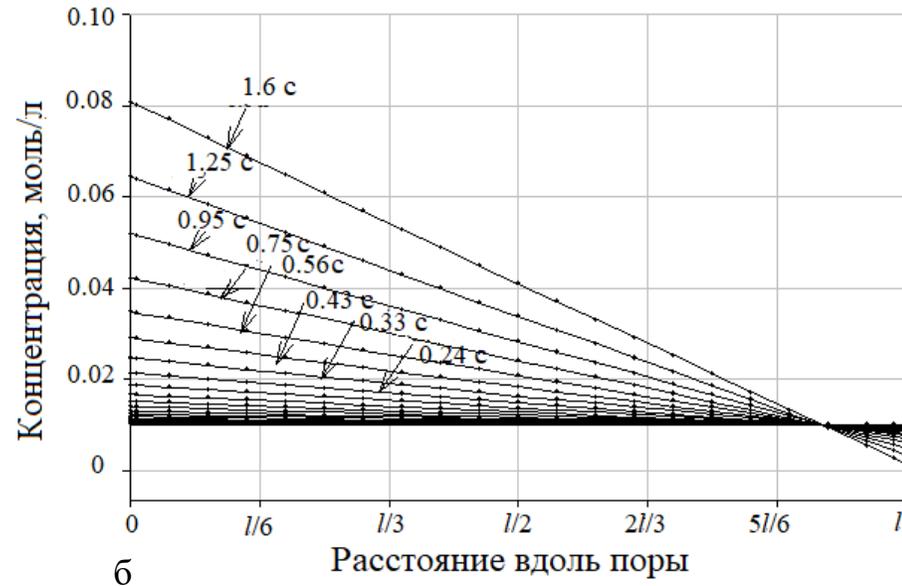
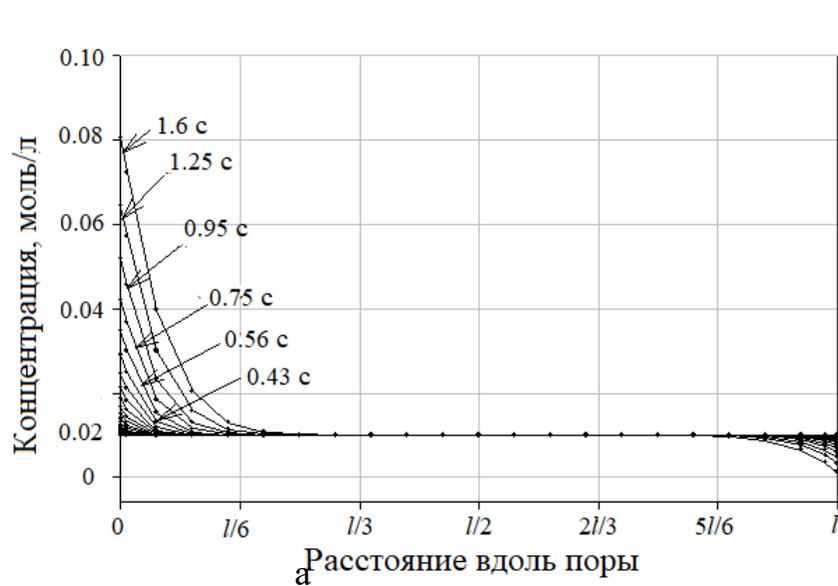
где  $f(x, t)$  — функция источников диффузии.



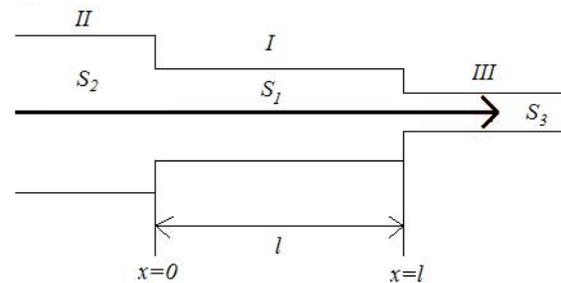
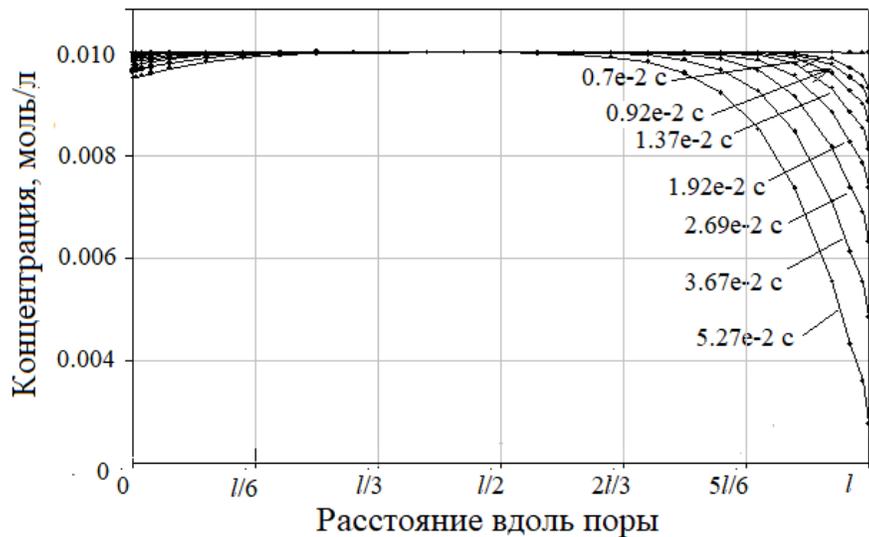
**Вывод 1. Механизм вызванной поляризации при Включении и выключении тока различен!!!**

Граничные условия рассчитаны для левой и правой стороны основной поры основной поры  $I$  при выключении тока. Индексы (1, 2) и (3, 4) означают расчеты для внутренних и внешних граничных

На рисунке показано распределение концентрации в поре на разных временах процесса диффузии.



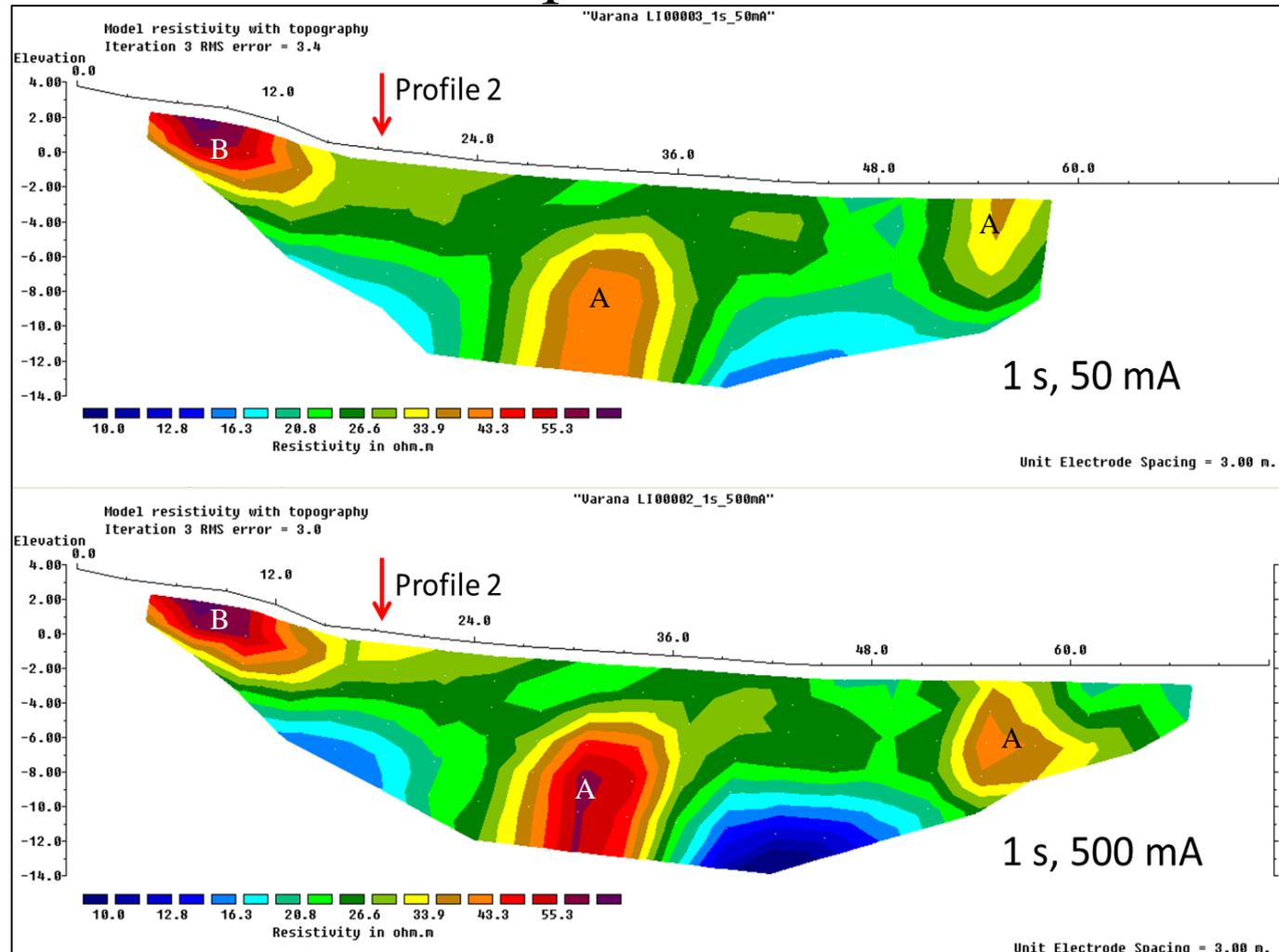
. Распределение концентрации внутри поры на различных временах. Длина поры  $l = 2$  мм (а) и  $0.02$  мм (б), числа переноса  $n1k=0.5$ ,  $n2k=0.63$ ,  $n3k=0.53$ .



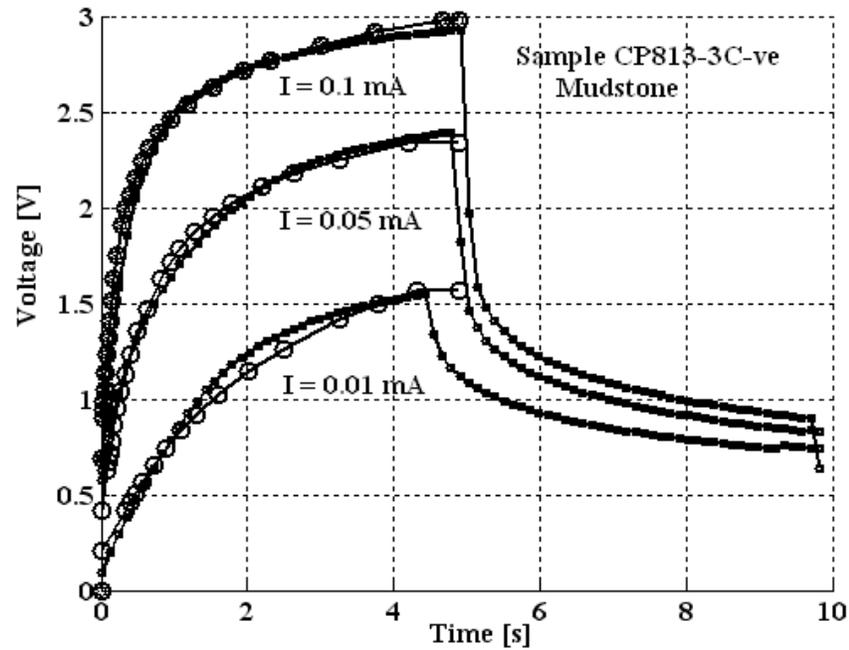
**Вывод 2.** Время установления процессов мембранной поляризации намного больше, чем электрокинетической

Время установления медленных видов поляризации (электроосмотической и миграционной) –  $10^{-6}$  –  $10^{-2}$  с. Еще более медленными являются рассматриваемые ниже мембранная и электрохимическая (гальваническая) поляризация

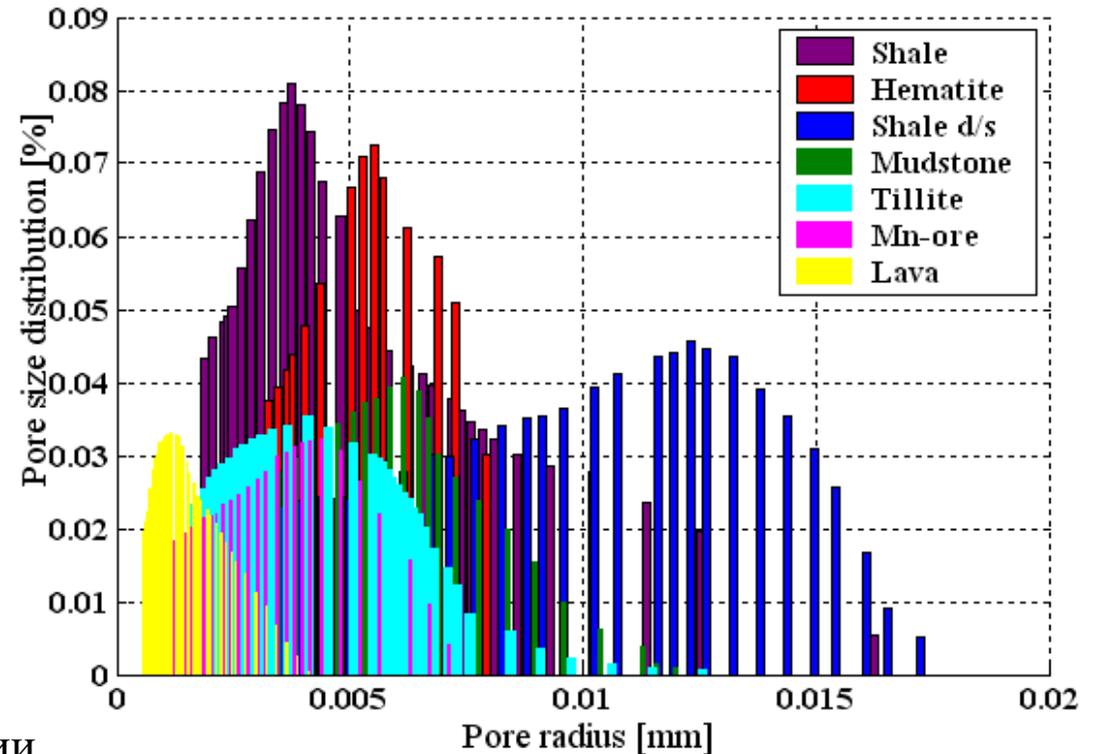
# Экспериментально обнаруженный эффект мембранной поляризации. Терригенные породы. Никакого присутствия рудных материалов. Италия



# Мембранная поляризация может использоваться для изучения распределения пор по размерам в образцах

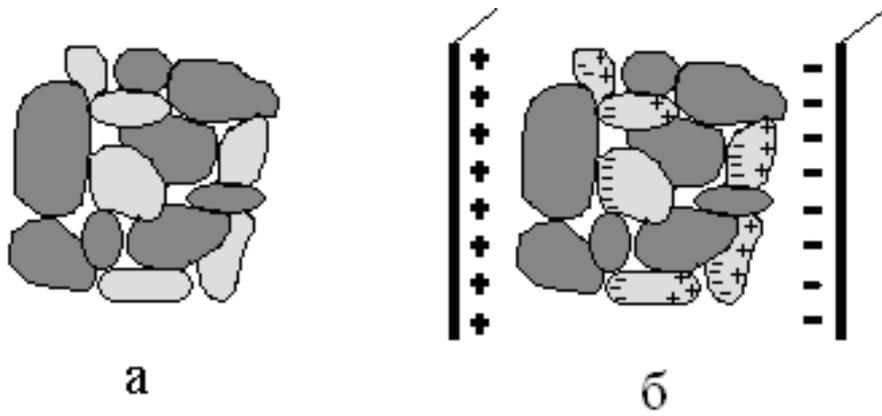


Математическая модель мембранной поляризации пород и экспериментальные данные



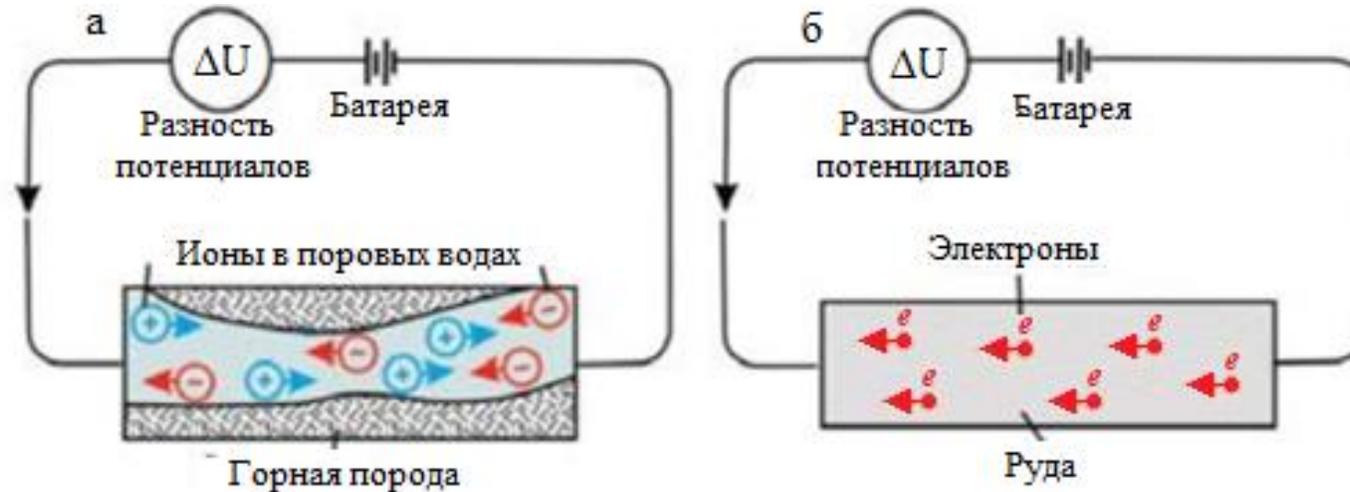
Распределение пор в образцах

# Миграционная поляризация

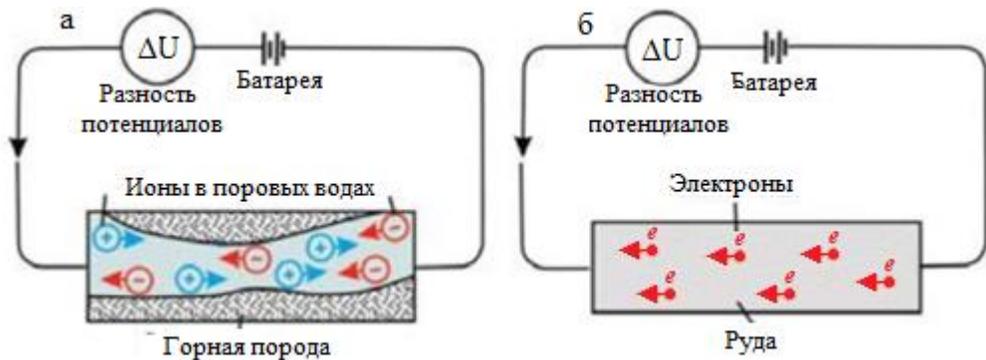


Механизм возникновения миграционной поляризации, возникающей в одиночных порах или зернах руды совершенно отличен от механизма мембранной поляризации. Если мембранная поляризация возникает лишь на контактах пор с разным поровым сечением, где возникают возрастает/убывает концентрация разноименных ионов, то в случае миграционной поляризации на стороне изолированной поры, обращенной к аноду, возникает скапливаются катионы, а на противоположной стороне, обращенной к катоду — анионы. Этот процесс завершится, когда все катионы и анионы заняли свой места по обе стороны от поры.

Возникает только при наложении разности потенциалов



# Миграционная поляризация в зернах руд



. Однако на другой стороне скопления ионов не происходит, поскольку отрицательно заряженные ядра кристаллической решетки неподвижна. Таким образом, концентрация ионов на стороне анода на любом времени зарядки зерна будет равна  $u/2$ . В результате описанных процессов проводящие частицы породы поляризуются (миграционная поляризация) и приобретают дипольный момент  $\vec{P}_M$  подобно большой молекуле. После мгновенного снятия разности потенциалов в порах/зернах происходит диффузия ионов/электронов и возвращение породы к стационарному состоянию.

Соответственно, механизм миграционной поляризации можно описать уравнением диффузии (при выключении без дополнительной функции источника), но граничные условия будут различны. Они также зависят от квадрата приложенной разности потенциалов. То есть, чем больше разность потенциалов, тем быстрее протекает перераспределения ионов/электронов.

**Вывод 1. Подвижность ионов Na, Cl, K, SO<sub>4</sub>, находящихся в водном растворе, мала и необходимы десятки и сотни миллисекунд для возникновения разности потенциалов на границах пор. Такие эффекты могут быть обнаружены только методом ВП при наложении не тока, а разности потенциалов**

Вывод 1. Подвижность ионов Na, Cl, K, SO<sub>4</sub>, находящихся в водном растворе, мала и необходимы десятки и сотни миллисекунд для возникновения разности потенциалов на границах пор. Такие эффекты могут быть обнаружены только методом ВП при наложении не тока, а разности потенциалов.

- Вывод 2. Подвижность электронов на пять порядков больше, чем ионов. Таким образом, мы предполагаем, что рассеянные тонкодисперсные зерна руд могут стать предметом изучения методом становления поля.

# Выводы

- Механизм разных типов поляризации различен.
- Разные типы поляризации могут проявляться на данных электроразведочных измерениях по-разному.
- Если объектом изучения является эффект ВП следует выбрать соответствующий метод, обеспечивающий максимальное его проявления в соответствующем интервале времен/ частот.