

Курс «Геофизические методы исследования» модуль «Электроразведка»



Владимир Алексеевич
Шевнин
shevninvlad@yandex.ru

Свойства пород

Аномалии в электроразведке возникают под влиянием различий в электрических свойствах пород. Этих свойств несколько, считается что их 5, и они обозначаются греческими буквами:

ρ - удельное электрическое сопротивление;

ϵ - диэлектрическая проницаемость;

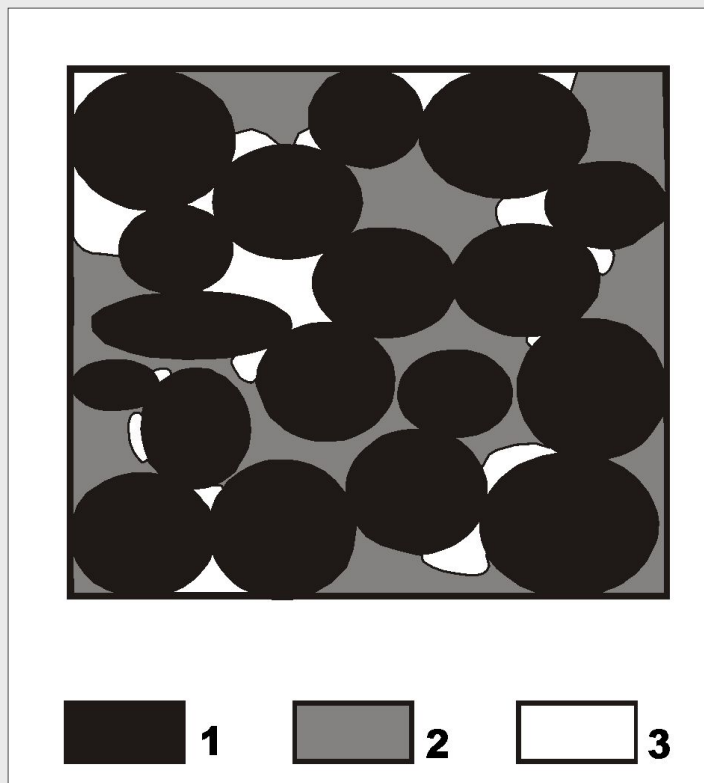
μ - магнитная проницаемость;

η - поляризуемость (или вызванная электрохимическая активность);

α - естественная электрохимическая активность.

Важнейшим свойством в электроразведке является сопротивление, большинство методов электроразведки реагируют именно на это свойство.

Удельное электрическое сопротивление



Горная порода это неоднородная среда. Она состоит из твердых частиц (1), из влаги в трещинах и порах (2), и газов в трещинах и порах (3). Сопротивление твердых частиц во много раз больше, чем у воды в порах породы, поэтому электрический ток идет по поровой влаге. Газы (воздух) имеет очень высокое сопротивление. В некоторых редких случаях сопротивление твердой фазы очень небольшое, когда она сложены минералами с электронной проводимостью (как у металлов). Это самородные элементы: золото, серебро, медь, платина, графит; оксиды (магнетит), сульфиды (пирит, галенит). Минералов с электронной проводимостью: известно около 50 из общего списка из 3000 минералов (или 1.5%).

Влияние пористости

Если сопротивление твердой фазы очень высокое, то оно мало влияет на общее сопротивление породы. Влияет сопротивление воды, а оно зависит от солености поровой влаги и может меняться от 1 до 1000 Ом.м (основная единица измерения сопротивления). Кроме сопротивления воды влияет еще количество воды (оно зависит от пористости и влажности).

Влияние пористости было описано американским

геологом Арчи в 1942 г.

$$\rho = R_{п} \rho_{В}$$

, где $R_{п} = a / n^m$

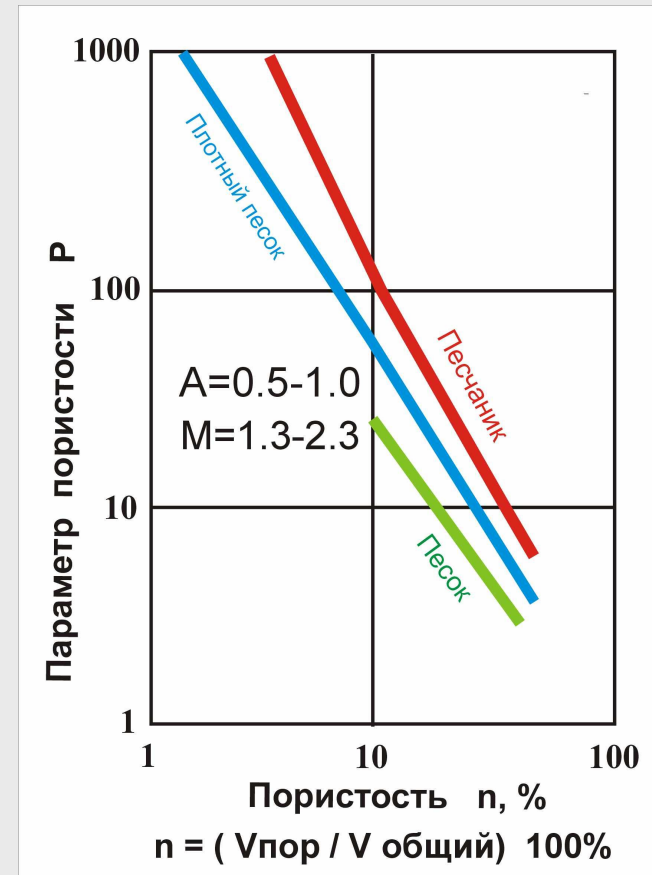
a – структурный коэффициент (0.5-1),

n – коэффициент пористости,

m – показатель цементации или извилистости пор - tortuosity (1-2.5)

- зеленый - песок,
- синий - плотный песок,
- красный - песчаник

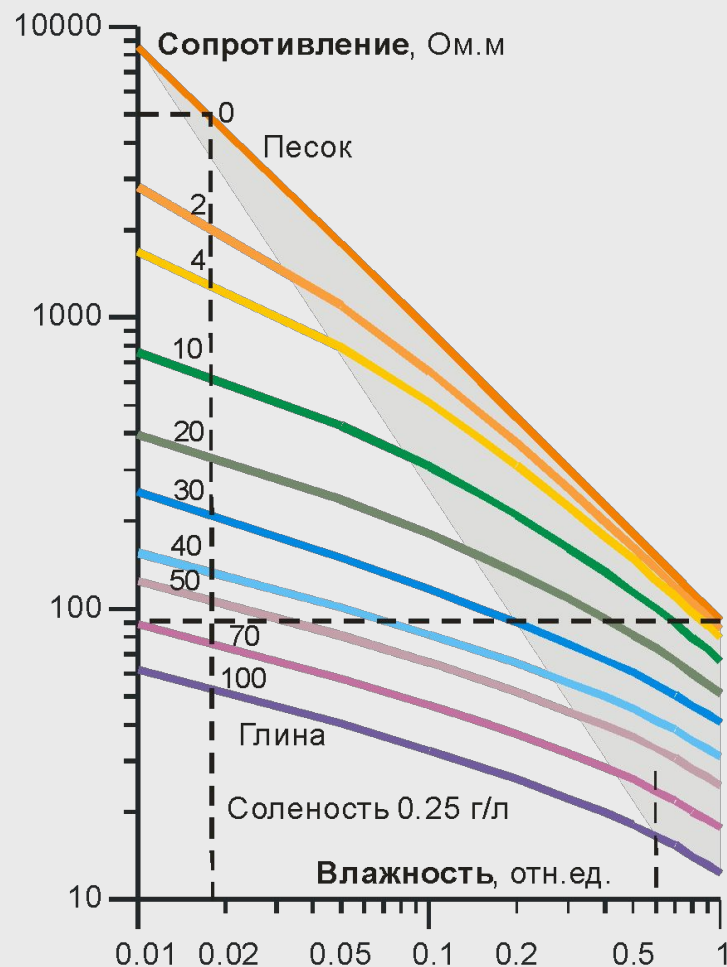
Больше пористость - меньше сопротивление



Влияние влажности

Чем больше влажность, тем меньше сопротивление грунта, но есть еще влияние литологии (состава) грунта. В песке все поры открытые, а в глине много закрытых пор. Поэтому в песке влажность меняется сильно, а в глине заметно слабее. На фото - высохшая поверхность глины (такыр), образуются трещины, но влажность меняется слабо. Между песком и глиной остальные грунты ведут себя как показано на рисунке.

Ниже УГВ грунты водонасыщены, выше УГВ - находятся в зоне аэрации. Выше УГВ находится зона капиллярного поднятия или капиллярная кайма, в ее пределах влажность меняется в 5 раз. Какая мощность капиллярной каймы? Зависит от типа грунта.



Высота капиллярного поднятия или мощность капиллярной каймы

Тип грунта	Высота капиллярной каймы в см (или в м)
Песок крупнозернистый	2-3.5 см
Песок среднезернистый	12-35 см
Песок мелкозернистый	35-120 см
Супесь	120-250 см (до 2.5 м)
Суглинок	350-650 см (до 6.5 м)
Глина легкая	650-1200 (до 12 м)
Глина тяжелая	до 150 м

Формула В.Н.Дахнова

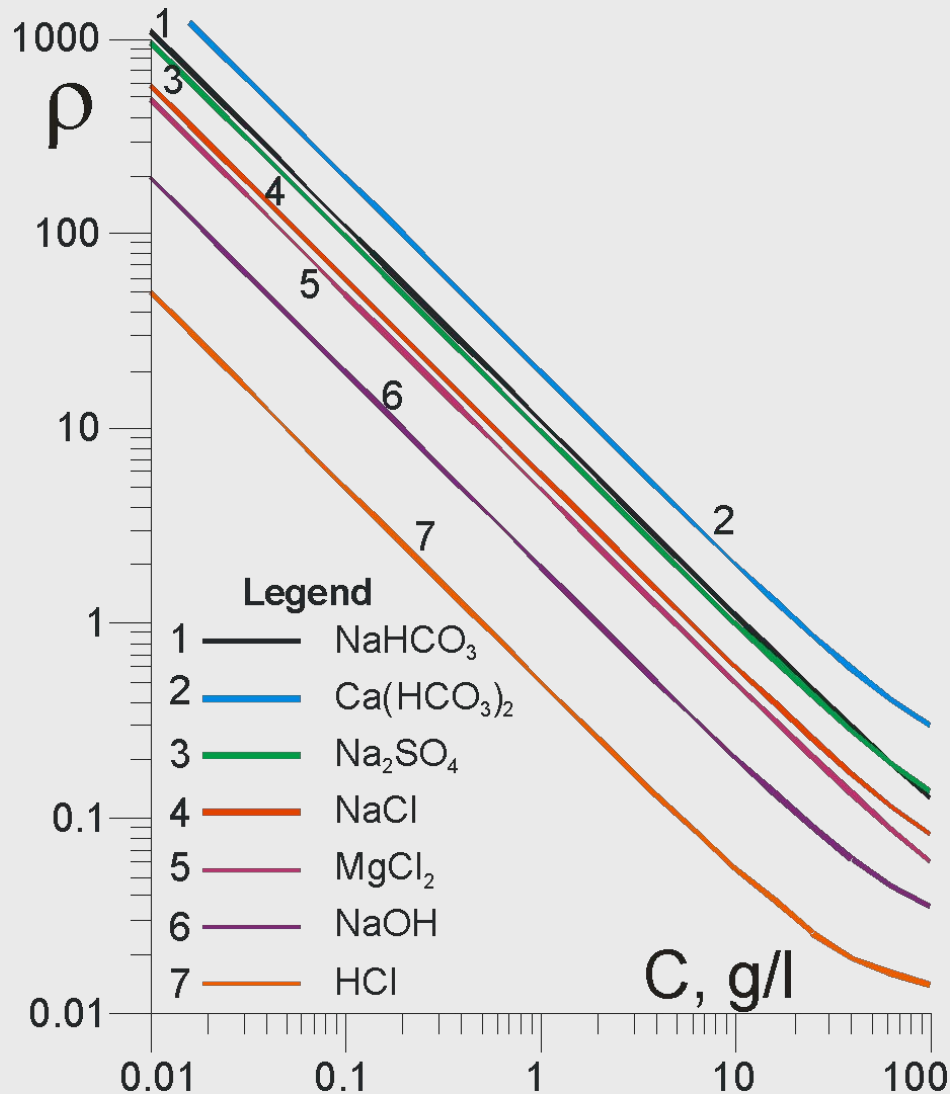
$$\rho = R_{\text{п}} \cdot R_{\text{в}} \cdot R_{\text{г}} \cdot R_{\text{т}} \cdot R_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{в}}$$

- $R_{\text{п}}$ – параметр пористости,
- $R_{\text{в}}$ – параметр влажности,
- $R_{\text{г}}$ – параметр глинистости,
- $R_{\text{т}}$ – температурный параметр,
- $R_{\text{э}}$ - параметр наличия электронных проводников
- $\rho_{\text{в}}$ – сопротивление воды

Важный фактор в формулах Арчи и Дахнова - это сопротивление воды.

Сопротивление породы прямо пропорционально сопротивлению воды.

Сопротивление воды от солености и 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 будут 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 (меньше) 5 г/л.

Главное - измерять и знать сопротивление воды!

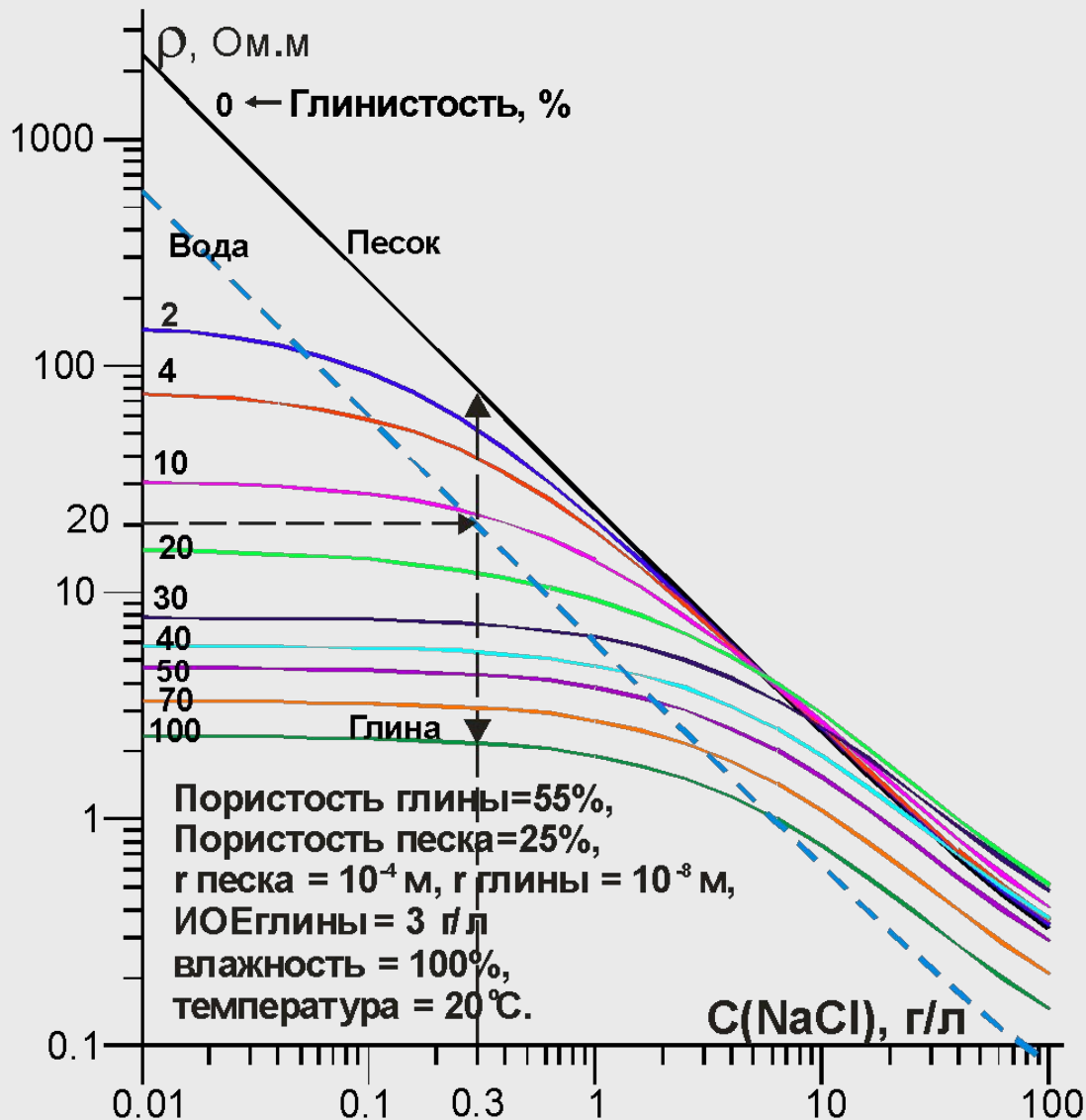
Воды России

по И.Н.Модину



Глинистость, как точная наука

Палетка А.А.Рыжова



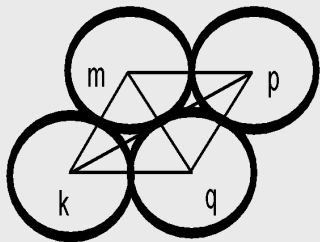
Палетка – это зависимость сопротивления грунта (смеси песка и глины) и солености поровой влаги. Вверху – линия песка, внизу линия глины, синий пунктир – линия воды. Справа (при высокой минерализации) - двойной электрический слой ДЭС не работает и сопротивление определяется пористостью. Слева (пресные воды) - работает ДЭС – в песке он не влияет, а в глине – влияет. Сухая глина изолятор (!!!), но когда тонкие поры заполняет пресная вода, то сопротивление глины меньше сопротивления воды.

Пористость зернистых грунтов

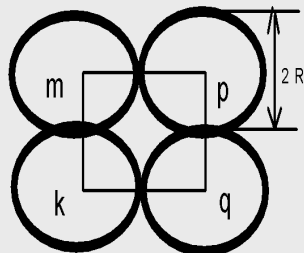
Зернистые (рыхлые) породы часто встречаются в верхней части разреза - ВЧР. У них бывают поры сообщающиеся (эффективная пористость) или изолированные, открытые и закрытые. Глины – малая эффективная пористость, но высокая общая пористость (60%).

$$K = \frac{V_{\text{ПОР}}}{V_T} \quad \text{Объемная пористость – отношение объема пор к объему тела}$$

Простейшая модель – сферические зерна одинакового размера



a)



b)

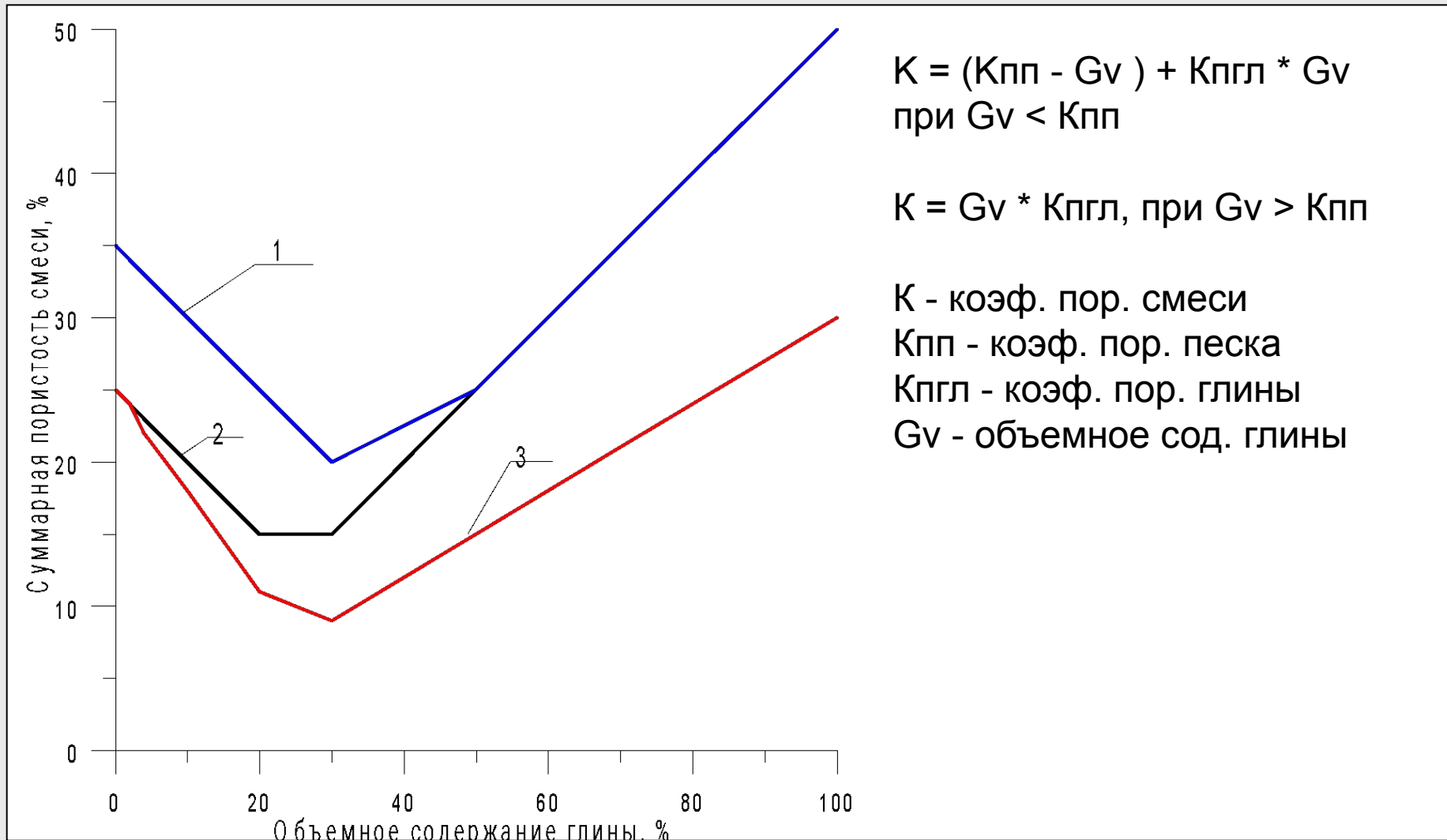
Укладка сферических частиц:

а) гексагональная - угол $m\hat{p}q = 60^\circ$; $K = \underline{25.95\%}$

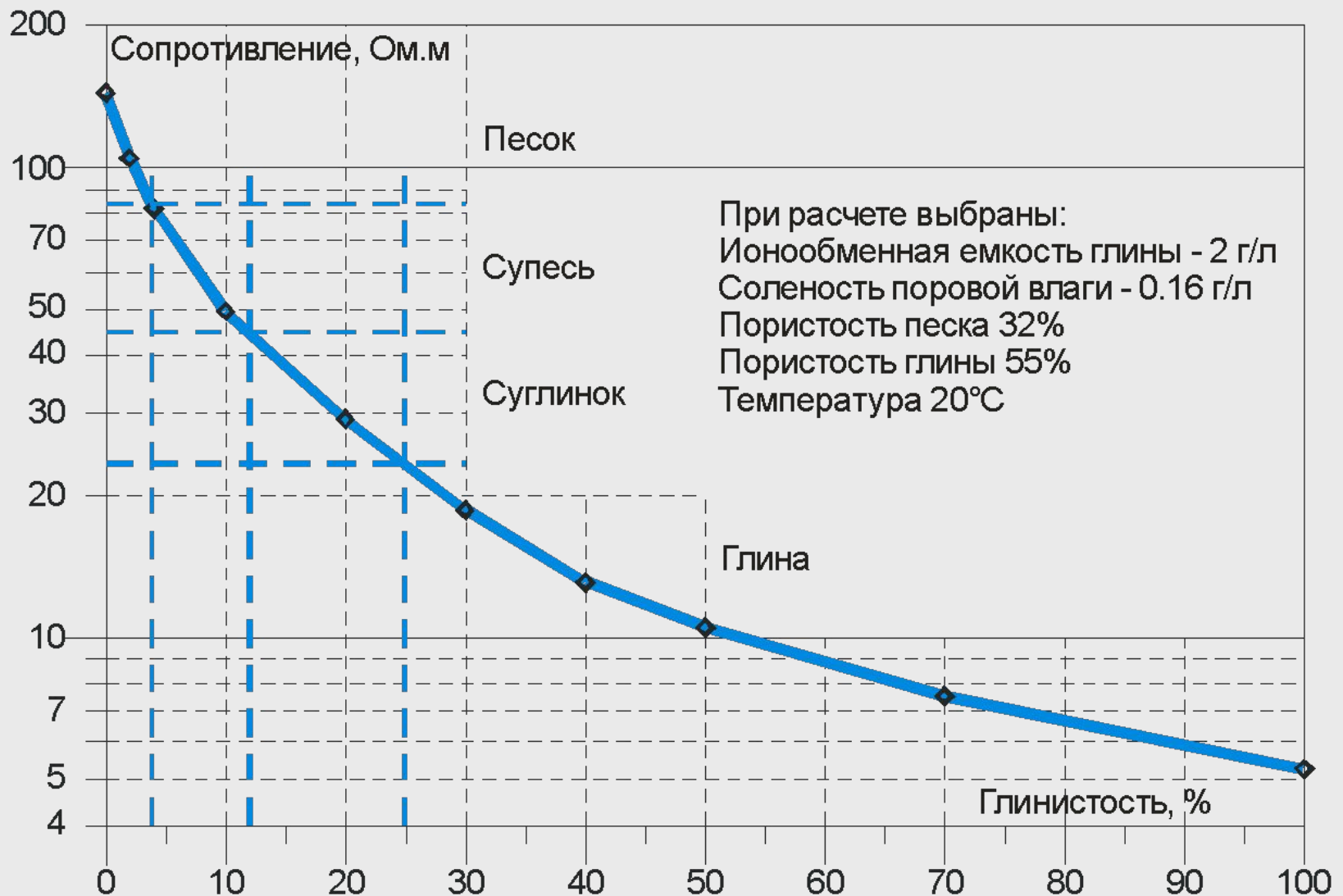
б) кубическая - угол $m\hat{p}q = 90^\circ$. $K = \underline{47.64\%}$

Эти расчеты впервые сделаны Д.Максвеллом

Пористость в двухкомпонентной модели А.А.Рыжова (песок и глина)



Сопротивление от глинистости



Глинистость

Классификация рыхлых грунтов по их глинистости (варианты)

Грунт	1. Содержание глины, %	2. Содержание глины, %
Песок	0-4	0-3
Супесь	4-10	3-16
Суглинок	10-30	12-25
Глина	30-100	25-100

Зависимость УЭС от температуры

в области положительных значений $t^{\circ}\text{C}$) имеет вид:

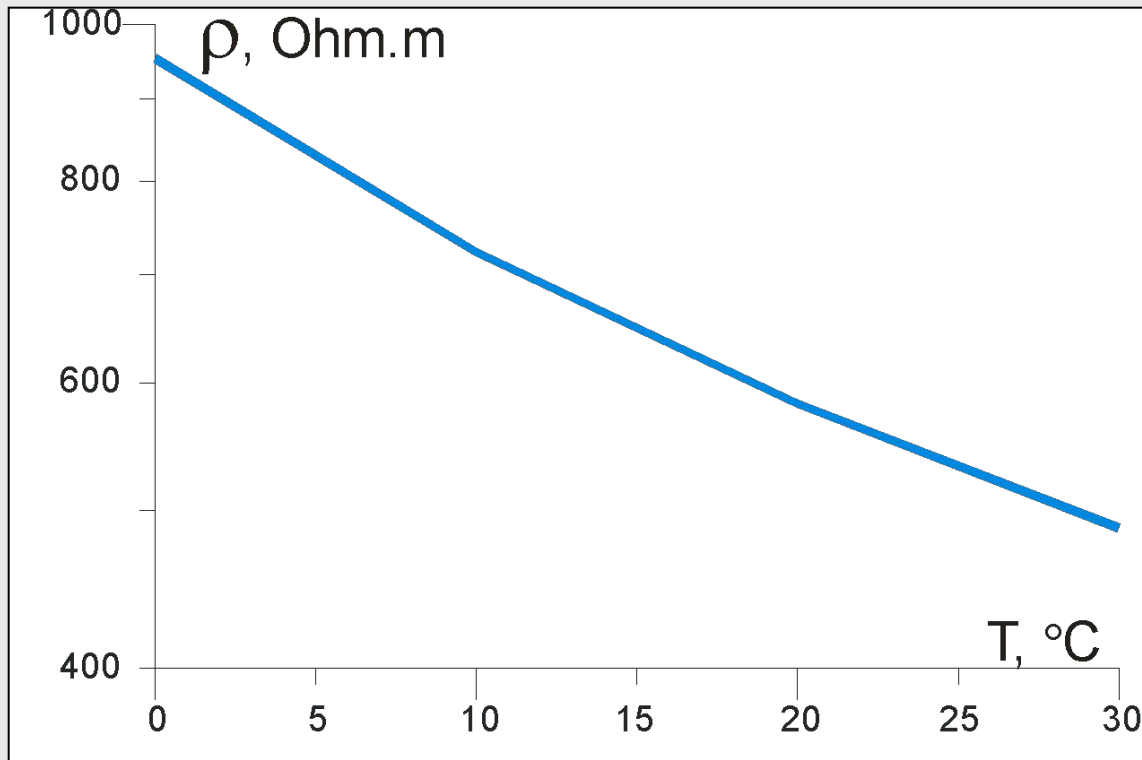
$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_{18} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 18^{\circ}\text{C})] \\ \sigma_T &= \sigma_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20^{\circ}\text{C})] \\ \sigma_T &= \sigma_{25} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 25^{\circ}\text{C})] \end{aligned}$$

Формулы однотипны, но они не единственные, есть и другие.

$\sigma = 1/\rho$

где ρ_t - удельное сопротивление при температуре $t^{\circ}\text{C}$, $\rho_{18,20,25}$ - удельное сопротивление при температуре 18, 20, 25 $^{\circ}\text{C}$, α - температурный коэффициент, который для водных растворов NaCl в диапазоне температур от 0 до 50 $^{\circ}\text{C}$ равен 0.026 (0.0177, 0.02, 0.025). Однотипно для воды и грунтов.

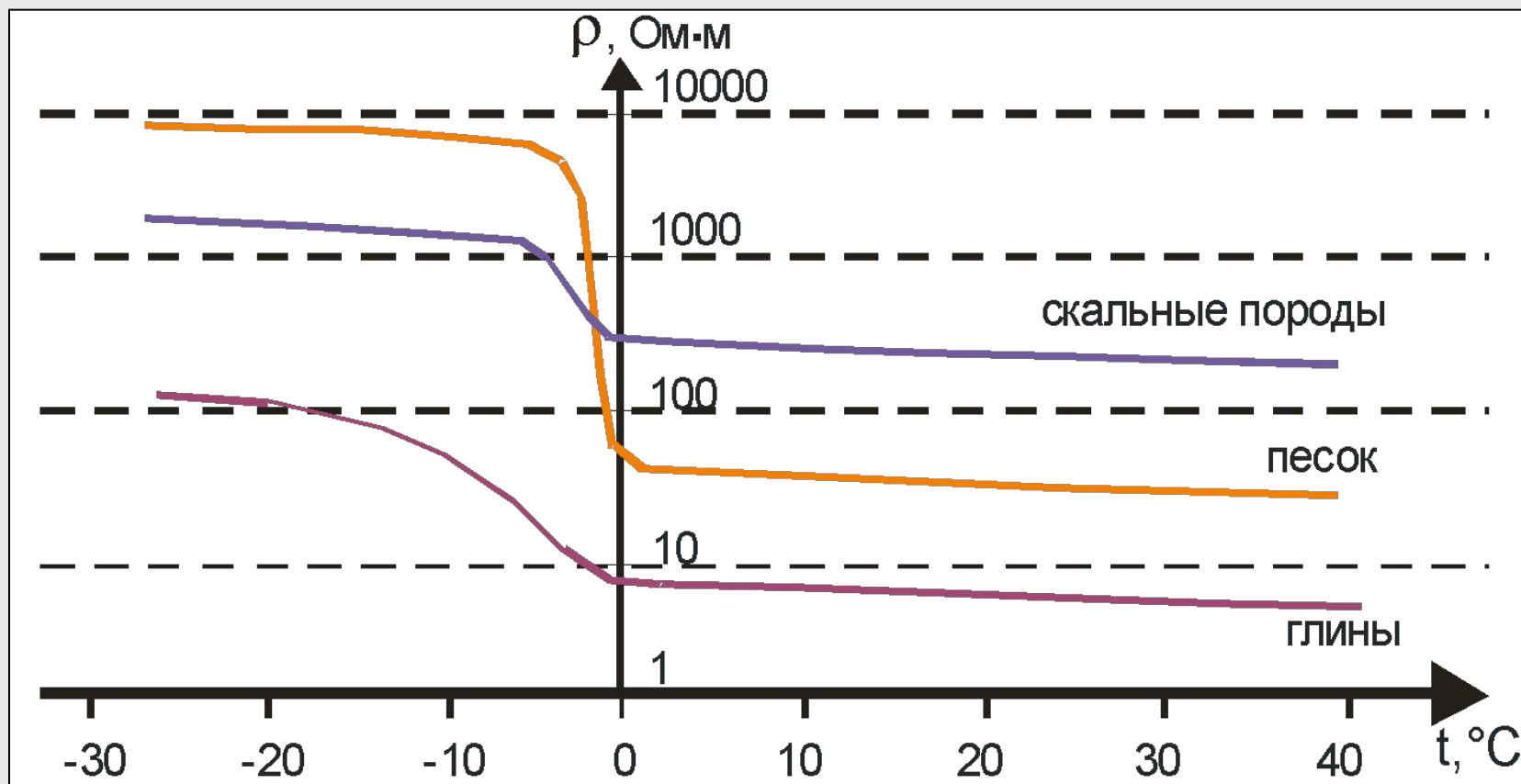
Зависимость УЭС от температуры



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**.

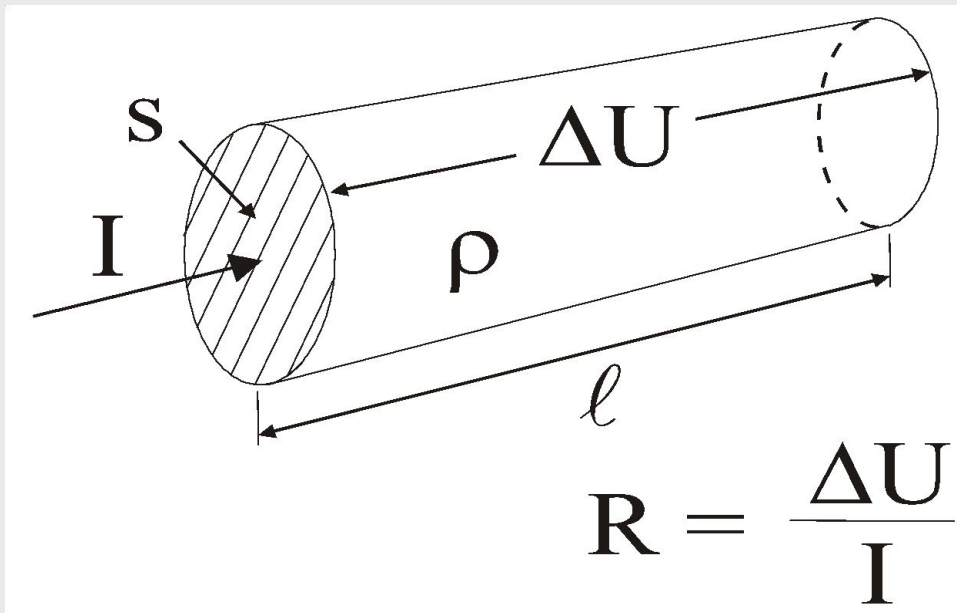
Важный вывод: если сопротивление воды и грунта **зависит от температуры**, то надо **ИЗМЕРЯТЬ** температуру при работах в поле и **ЗАПИСЫВАТЬ!**

Зависимость УЭС от температуры при замерзании горных пород

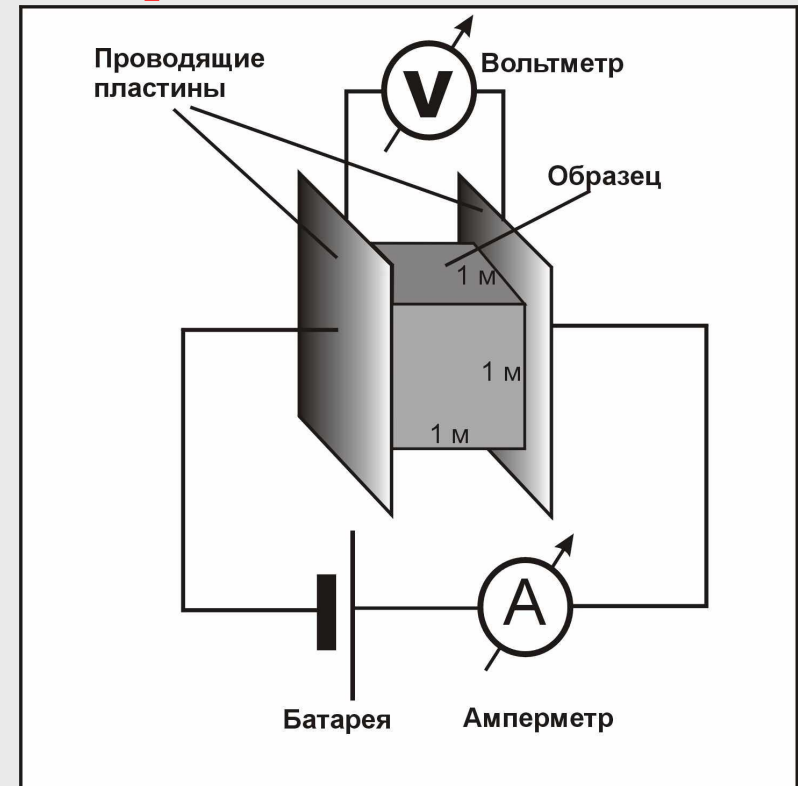


>50% территории России находится в зоне многолетней мерзлоты. Песок меняет свое сопротивление при замерзании в 100-1000 раз.

Удельное электрическое сопротивление горных пород Как его измерить?



$$R = \rho \cdot l / S$$



Образец - идеальный цилиндр (или идеальный куб)

Измерение сопротивления в небольшом резистивиметре



Сложная форма, не куб и не цилиндр, но сосуд можно калибровать (объем всего 200 мл). Удобно для рыхлых грунтов.

Такие резистивиметры можно найти и купить в России

Тест портативных кондуктометров


	2250 руб	5800 руб	6618 руб	7000 руб	2900 руб
РОЗНИЧНАЯ ЦЕНА					
ОТКАЛИБРОВАН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В 3 СРЕДАХ NaCl 342 ppm, KCl и 442 ppm	●	●	●	●	●
АВТОКОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ 3 СРЕД	●	●	●	●	●
РАСШИРЕННЫЙ ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЙ	●	●	●	●	●
АВТОРАНЖИРОВАНИЕ	●	●	●	●	●
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 0.1ppm/μS	●	●	●	●	●
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И МИНЕРАЛИЗАЦИИ	●	●	●	●	●
ДВУХСТРОЧНЫЙ ДИСПЛЕЙ	●	●	●	●	●
					
	IM DIGITAL COM-100 www.tdsmeter.ru	EXTECH EC400	HANNA DIST 5/6	OAKTON (Eutech) TDS/EC Testr Series	MILWAUKEE Sharp Waterproof series

Таблица электрических свойств воды предельно допустимых для человека и ЖИВОТНЫХ

Из книги Dr. R. I. Acworth. Electrical methods in groundwater studies, Университет Нового Южного Уэльса, Австралия.

Животные и человек	Проводимость, мСм/м	Сопротивление, Ом.м
Человек	250	4
Птицы	580	1.72
Свиньи	660	1.52
Лошади	1160	0.86
Крупный рогатый скот	1720	0.6
Овцы	2300	0.43

УЭС горных пород

Типы горных пород	ρ , Омм
Рудные	
Халькопирит	$10^{-3} - 10^{-1}$
Галенит	$10^{-5} - 10^{-3}$
Пирит	$10^{-4} - 10^{-1}$
Пирротин	$10^{-5} - 10^{-4}$
Магнетит	$10^{-1} - 10^{-2}$
Лимонит	$10^6 - 10^8$
Гематит	$10^4 - 10^6$
Сфалерит	$10^5 - 10^7$
Магматические горные породы	
Гранит, гнейс	$10^3 - 10^4$
Диорит, габбро	$10^4 - 10^5$
Базальт	$10^3 - 3 \cdot 10^3$
Диабаз	$10^5 - 10^6$
Терригенные осадочные породы	
Глина	5 — 20
Суглинок	15 — 30
Супесь	30 — 50
Песок	50 — 200
Песчаник	>100
Карбонатные осадочные породы	
Мрамор	300 — 1000
Известняк	100 — 500
Глинистый известняк	50 — 100
Мергель	30 — 50
Карбонатизированные глины	20 — 30
Доломит	500 — 2000
Галогенные осадочные породы	
Каменная соль	$\sim 10^{15}$
Гипс	$10^5 - 10^6$
Ангидрит	$10^3 - 10^5$
Горные породы органического происхождения	
Нефть	$10^9 - 10^{16}$
Нефтенасыщенный песок, песчаник	50 — 200
Бурый уголь	$10^2 - 10^3$
Каменный уголь	$10^2 - 10^6$
Антрацит	$10^{-4} - 10^{-2}$
Графит	$10^{-6} - 10^{-4}$
Графитизированные сланцы	$\sim 10^{-3}$

$t=18^\circ\text{C}$.

- Подавляющее большинство рудных минералов обладает высокой проводимостью (электронной), только их мало.

- Магматические и галогенные породы имеют очень высокие сопротивления (малая пористость)
- Сопротивление терригенных пород возрастает по мере уменьшения глинистости

- Нефть, бурый и каменный уголь имеют высокие сопротивления, а антрацит и графит являются хорошими проводниками (электронная проводимость)

- Эта таблица не имеет указаний на влажность и соленость, которые могут заметно изменить свойства

Области высокой эффективности электроразведки (контраст)

- **Поиски и разведка руд (электронные проводники)**
- **Картирование глин (за счет прочносвязанной воды)**
- **Исследование мерзлоты (лед - очень высокое ρ)**
- **Разведка месторождений антрацита (низкое ρ)**
- **Инспекция химически загрязненных участков (влага с иной соленостью)**
- **Обследование трубопроводов (металл)**
- **Поиски геотермальных источников (температура)**

Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость ϵ показывает во сколько раз уменьшается сила взаимодействия электрических зарядов при переносе их из вакуума в данную среду

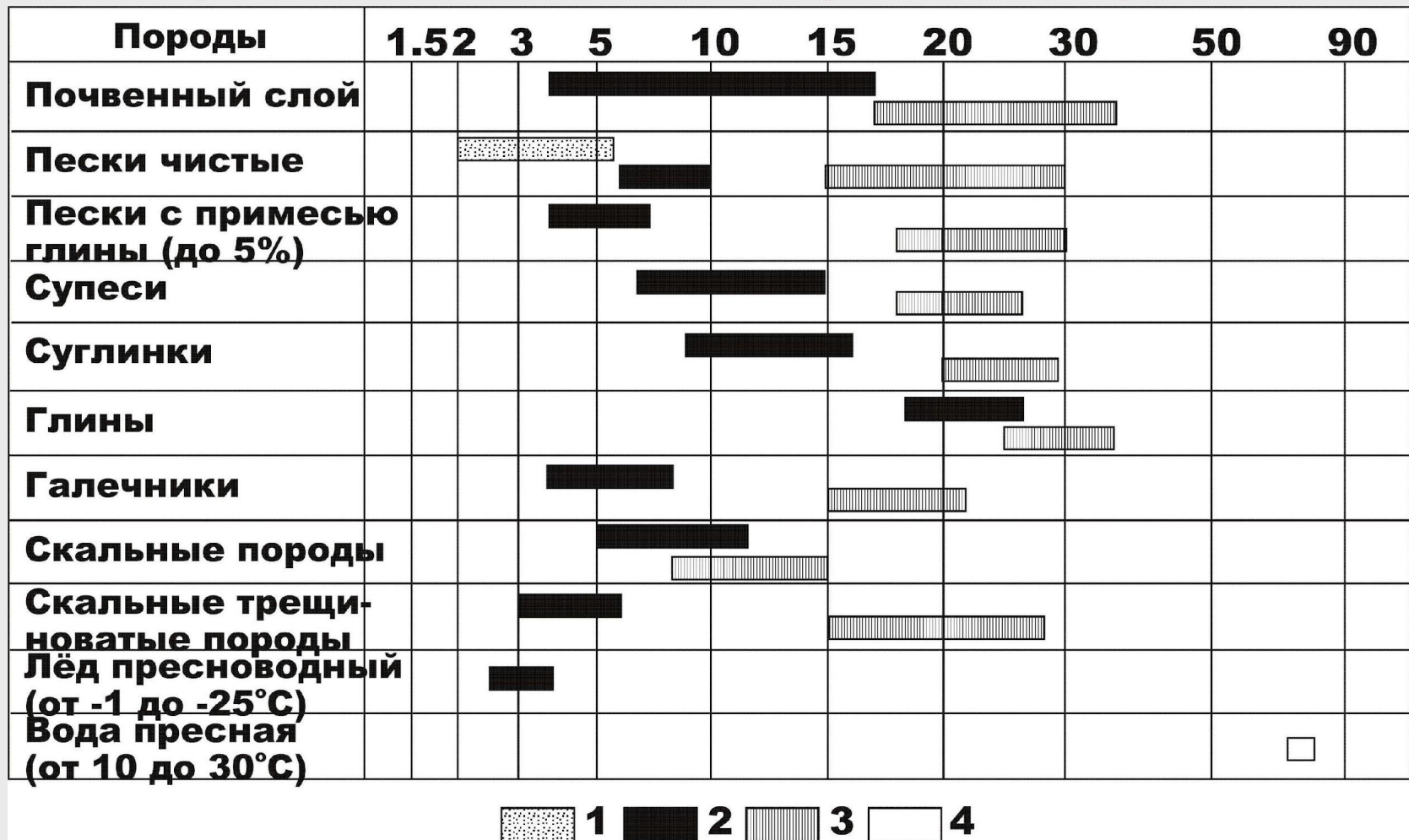
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_{\text{отн}}$$

$$\epsilon_0 = 1/(36 \pi) 10^{-9} \text{ Ф/м}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость породообразующих минералов

Минерал	$\epsilon_{\text{отн}}$	Минерал	$\epsilon_{\text{отн}}$
Кварц	4,3 – 6,4	Ангидрит	5,7 – 6,0
Халцедон	5,6 – 7,5	Гипс	6,3 – 7,9
Калиевый полевой шпат	4,5 – 6,0	Галит	5,6 – 6,4
Кальциевый полевой шпат	5,4 – 7,0	Сильвин	4,8
		Лимонит	10 – 11
Кальцит	7,5 – 8,0	Гидрослюда	17 – 25
Доломит	6,8 – 10	Каолинит	6,8 – 10

Таблица диэлектрической проницаемости горных пород



1 – сухие породы

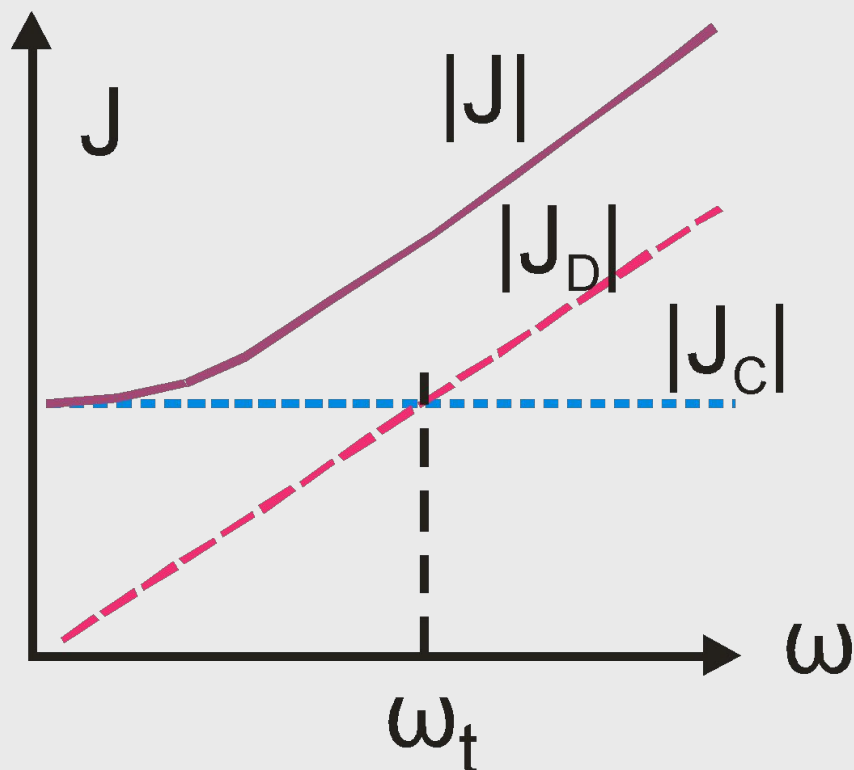
2 - естественная влажность

3 – полное насыщение

4 - вода

Когда влияет ϵ ?

$$k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon}$$



Волновое число, комплексная величина, состоит из двух частей, в одну входит σ , в другую ϵ . Первая часть связана с токами **проводимости**, вторая с токами **смещения**.

Соотношение этих токов меняется с частотой. На низких частотах преобладают токи проводимости, на высоких - токи смещения.

Распространение энергии на высокой частоте связано с токами смещения.

$$\frac{|J_C|}{|J_D|} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$$

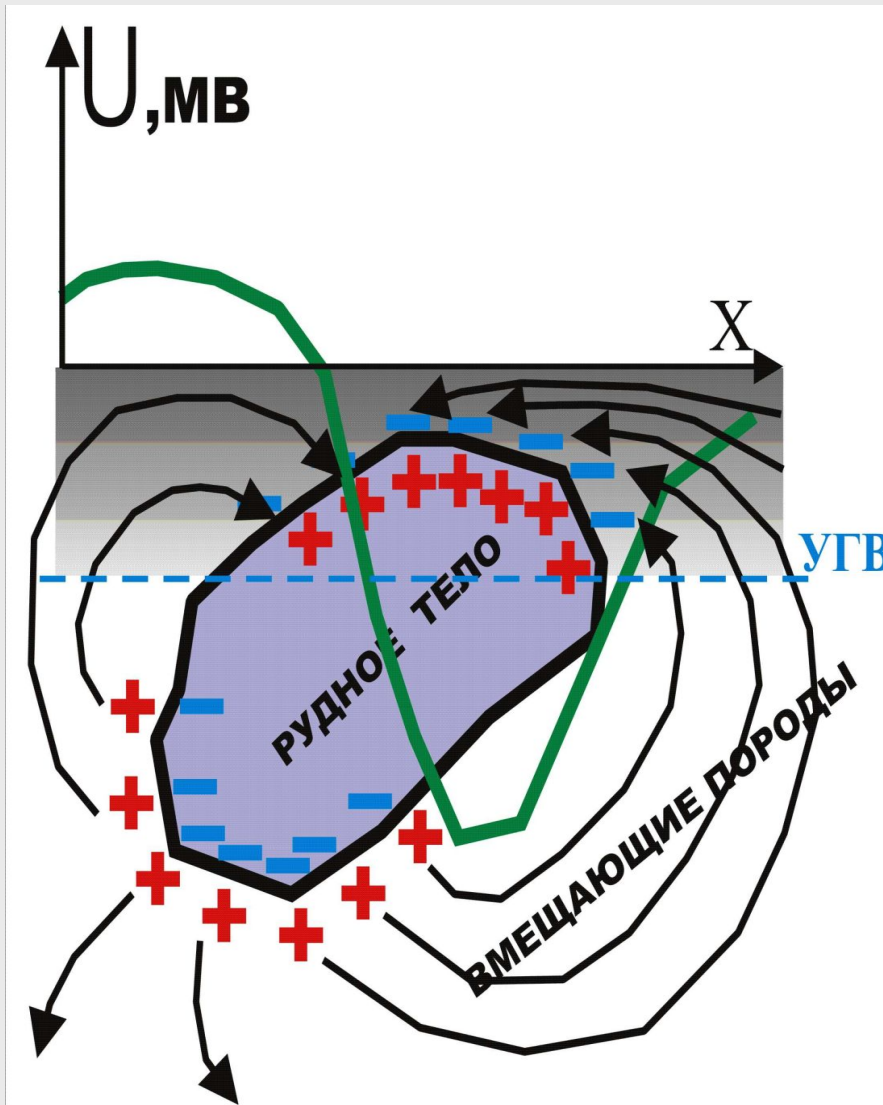
Соотношение этих токов зависит от частоты и от сопротивления среды (или проводимости). **Георадар** работает

при преобладании токов смещения. Частота больше 10 - 100 МГц. На таких высоких частотах влияет ϵ и ее можно определить.

Естественная поляризация горных пород. Естественная электрохимическая активность α

В первом предложении обозначено явление, а во втором - свойство. Эти понятия используются в методе естественного электрического поля (ЕП). Данное поле возникает под влиянием трех процессов в земле: окислительно-восстановительном (ОВ), диффузионно-адсорбционном (ДА) и фильтрационном (Ф). Важно отметить, что естественное поле **порождается процессами (а не свойствами)!** Когда есть процесс, возникает аномалия ЕП, процесс отсутствует или заканчивается, аномалия отсутствует.

Окислительно-восстановительные потенциалы

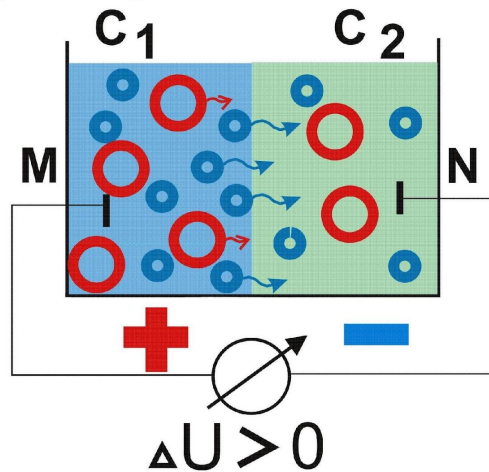


- Верхняя часть рудного тела в зоне окисления заряжается отрицательно
- Нижняя часть рудного тела в зоне восстановления заряжается положительно
- На поверхности наблюдается отрицательная аномалия ЕП
Максимальная ОВ аномалия - 1200 мВ по теории Сато и Муни (1960), основная причина перепад рН.

Происхождение диффузионно – адсорбционных потенциалов

$$\Delta U = (K_a - K_k) \lg \frac{C_1}{C_2} = \alpha \lg \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

Коэффициенты подвижности \nearrow
 Концентрации растворов \nearrow
 Электрические сопротивления

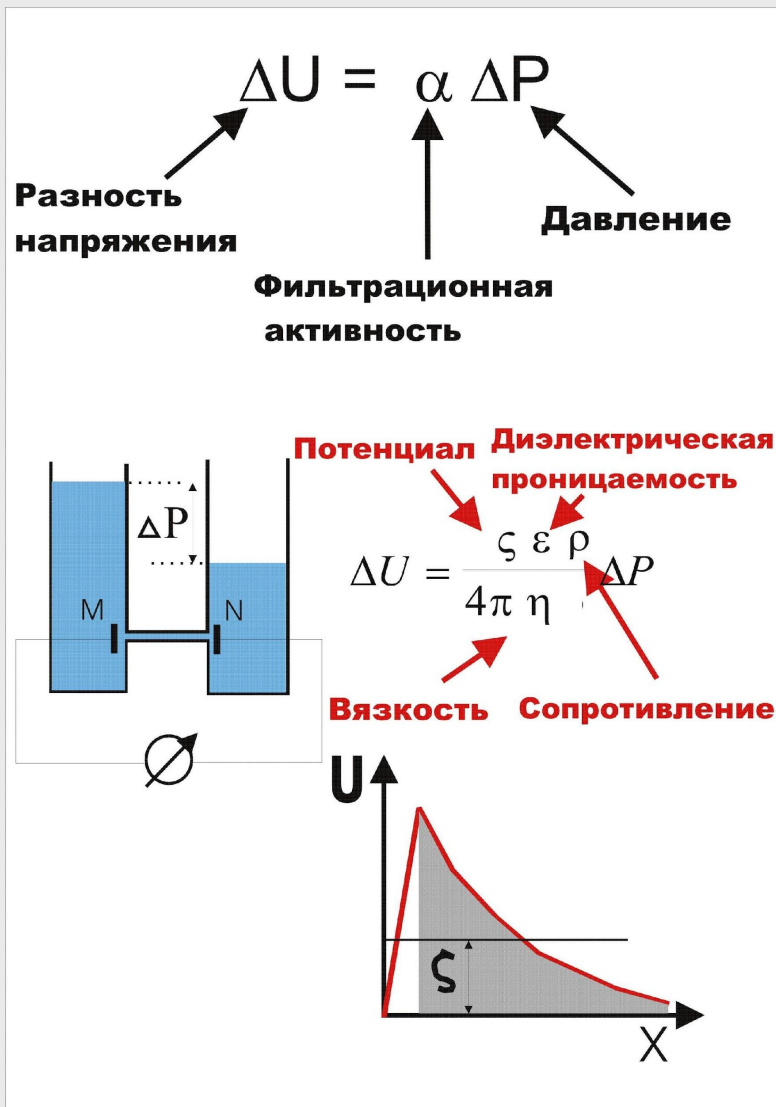


ПОТЕНЦИАЛЫ ПОРОД

Чистые пески	-5 мВ
Чистые глины	+50 мВ
Алевриты	+5 +10 мВ

- Ионы, имеющие разные заряды и размеры, движутся с разной скоростью (подвижностью).
- В результате адсорбции (прилипание к стенкам капилляров) часть ионов теряет свою подвижность.
- Почему движутся ионы: из области с избытком в область с недостатком.

Происхождение фильтрационных потенциалов



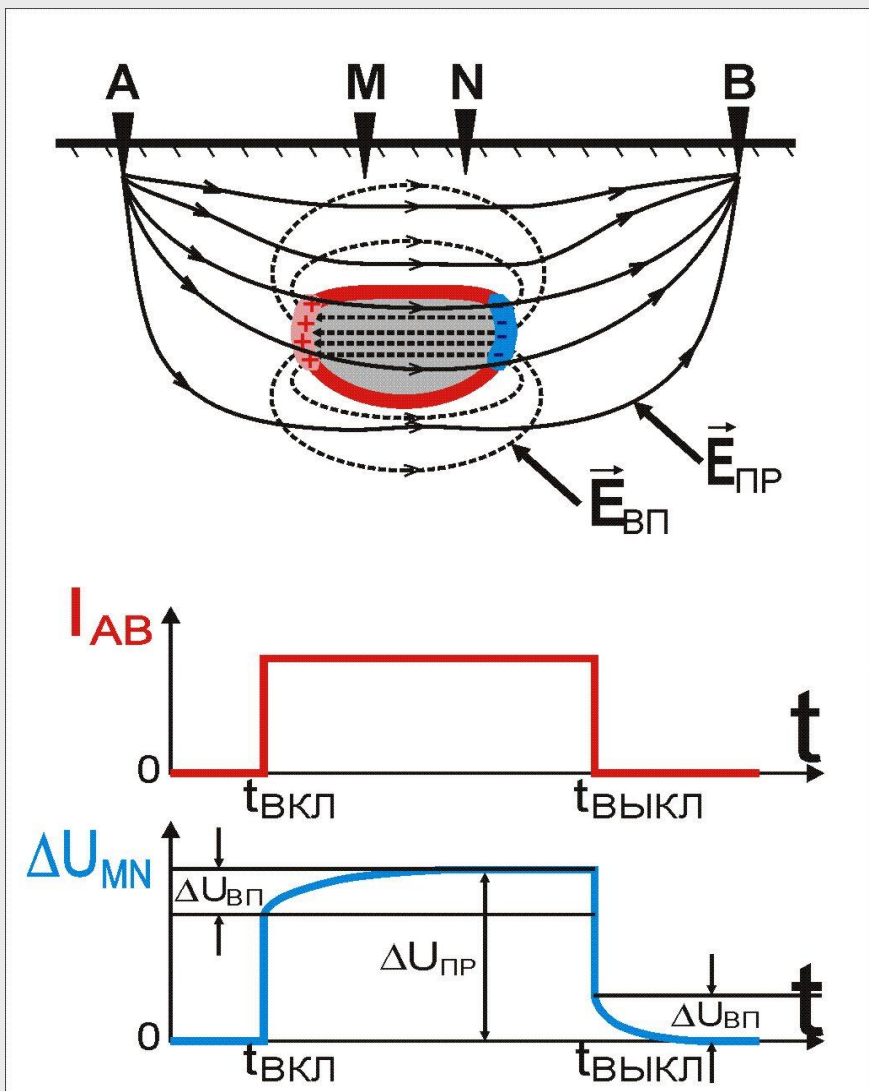
- При движении воды по тонким капиллярам происходит деформация двойного электрического слоя
- Формула Гельмгольца
- Чем выше сопротивление воды (меньше минерализация – шире двойной слой), тем больше потенциалы фильтрации

Заключение по методу ЕП

Метод ЕП - самый старый метод электроразведки. В первый период метод применяли для поиска массивных руд металлов, с середины 20 века началось изучение зон фильтрации воды, сейчас поиск руд не столь востребован, а изучение фильтрации применяется все чаще.

Диффузионно-адсорбционные поля существуют как явление, но при наземных работах они интереса не представляют, а вот при каротаже скважин их используют широко.

Вызванная электрохимическая активность или поляризуемость η



Это свойство применяется в методе вызванной поляризации (ВП). Возникает в неоднородных средах, сильнее, когда в породе есть минералы с электронной проводимостью. Явление похоже на зарядку конденсатора или аккумулятора, при пропускании тока запасается энергия, после выключения тока происходит разрядка. Мера поляризуемости

$\eta_k = (dU_{VP} / dU_{PP}) 100\%$ - отношение сигнала после выключения тока к сигналу в момент пропускания тока.

- А. Слабые аномалии < 3%**
- Б. Средние 3 - 5%**
- В. Сильные > 5%**

А - безрудные, Б-В - рудные.

Магнитная проницаемость горных пород

$$B = \mu H$$

B – магнитная индукция - реальная сила, которая производит ЭДС или отклоняет магнит

H – магнитное поле - это поле, которое производит электрический ток при перемещении зарядов

$$\mu = \mu_{\text{отн}} \mu_0 = (1+k) \mu_0$$

k - магнитная восприимчивость $10^{-5} - 10^{-3}$

Для большинства горных пород $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$

Для магнитных руд $\mu_{\text{отн}} = 1.5 - 3.5$

Для магистральных трубопроводов $\mu_{\text{отн}} 500 - 2000$

Это свойство на практике используется редко, чаще всего для горных пород $\mu_{\text{отн}} = 1$

Магнитная восприимчивость - k

$$\mu = \mu_{\text{отн}} \mu_0 = (1+k) \mu_0, k - 10^{-5} - 10^{-3} \text{ от } \mu_0$$

k изучают в магниторазведке, в электроразведке иногда тоже.



Переносной каппаметр
KM-7

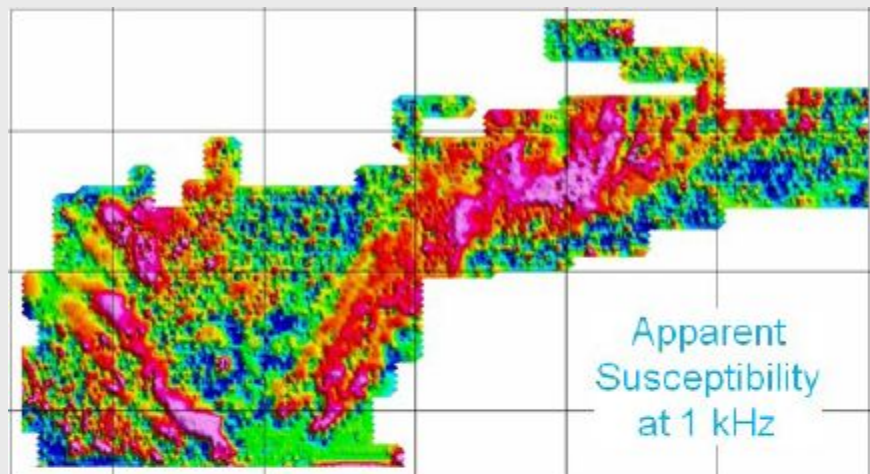


Чешский измеритель k
большого размера

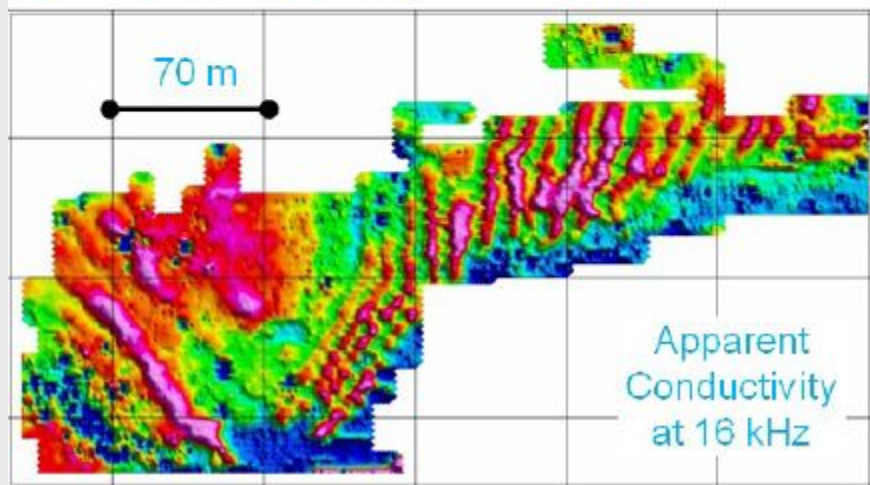


GEM-2 (США) для ДИП и
магн. восприимч. от Georhex.
Измеряет σ и k

Измерения σ и κ с GEM-2



Карта магнитной восприимчивости на свалке



Карта кажущейся проводимости