

CR - SIP

Комплексное сопротивление (CR)

или

спектральная вызванная поляризация
(SIP- СВП)

Введение

Конрад Шлюмберже получил патент на метод ВП в 1912. Однако лишь через 40 лет компания Ньюмонт начала практическое использование этого метода. С этого момента (конец 1940'х годов) в течение еще 40 лет расцвела активность в области как теории, так и практики ВП, главным образом для поисков вкрапленных сульфидов. Однако, после падения цен на медь в 1983, драматически упал интерес к рассеянным сульфидам и соответственно к исследованиям об источниках и природе явления вызванной поляризации (ВП).

Падение цен на нефть в 1985 году еще сильнее снизило интерес к ВП, который использовался как один из альтернативных несейсмических методов в разведке углеводородов. Только в последние несколько лет этот интерес стал возрождаться. Метод ВП в последнее время стал меняться - новые методики.

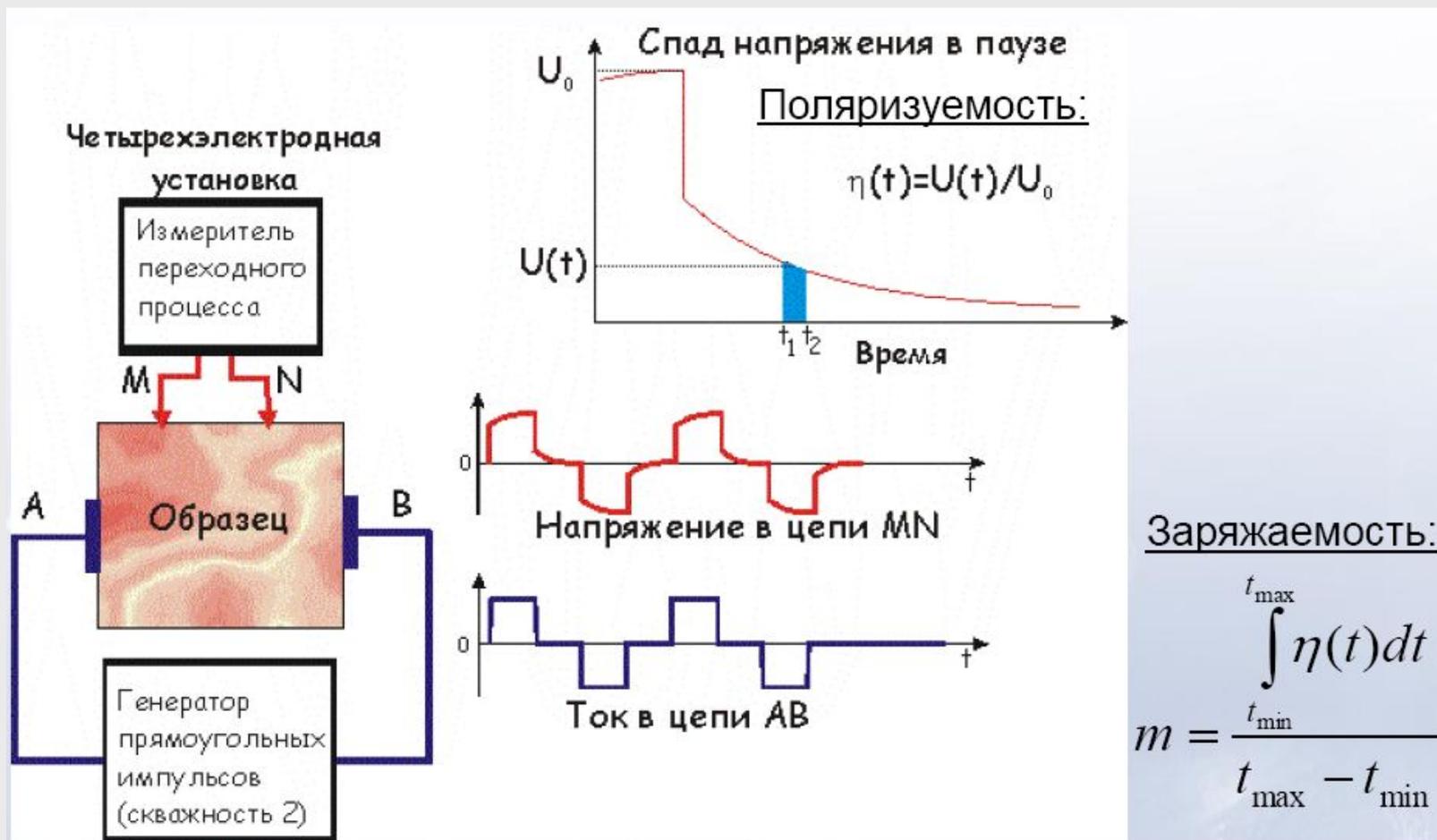
Метод комплексного сопротивления (CR) или Спектральной ВП (SIP) существует несколько десятилетий, но в последнее время происходит очень быстрый рост исследований по данной теме. Два основных направления - рудные и нерудные исследования.

По рудным задачам удастся распознать электронные проводники с графитом, пиритом и рудными минералами.

По нерудным задачам удастся определить гранулометрический состав грунтов, глинистость, коэффициент фильтрации, поверхностную проводимость.

Метод ВП и его параметры

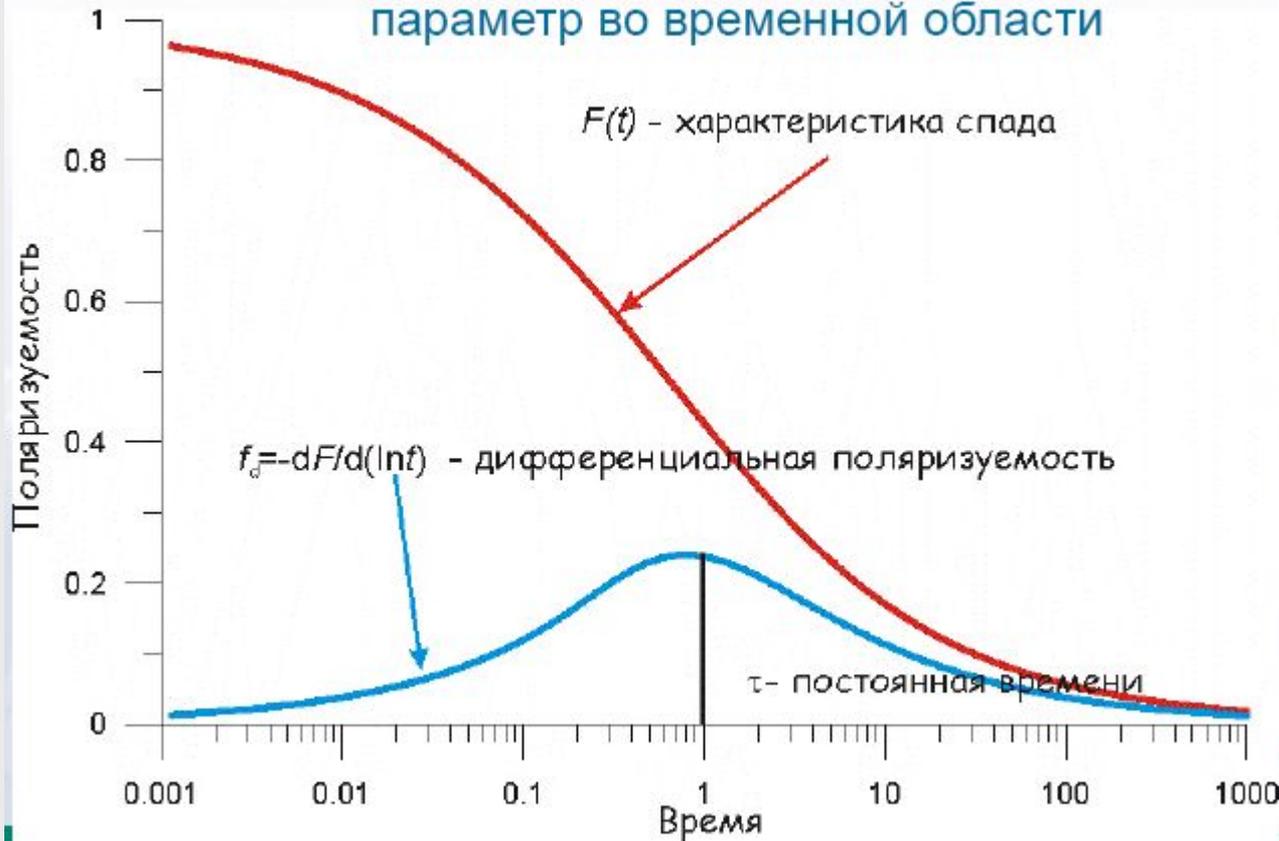
Во временной области



Близкие параметры - мгновенная амплитуда в заданный момент или площадь под кривой спада в заданном интервале времени.

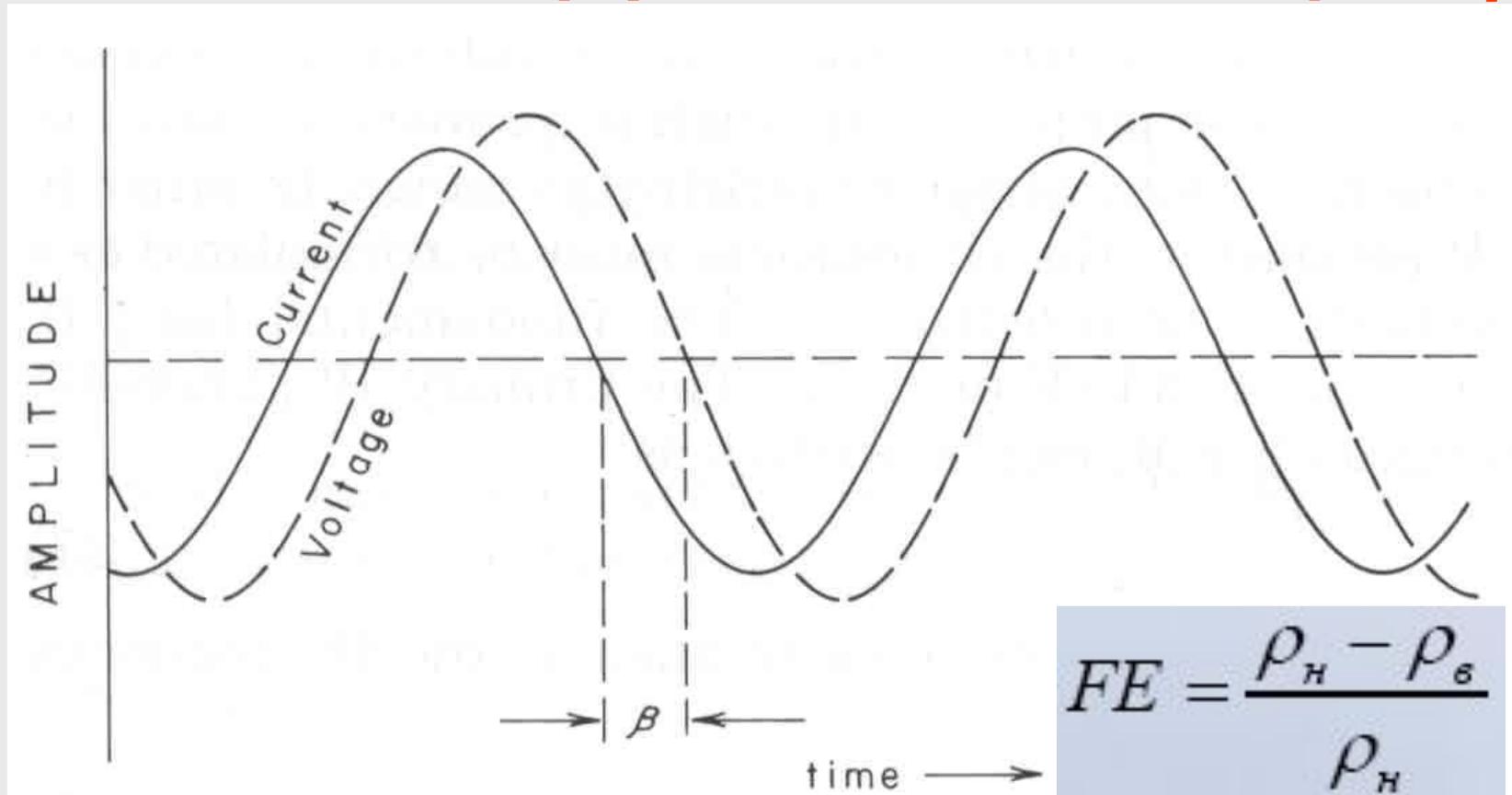
Спад ВП

Исторически – первый спектральный параметр во временной области



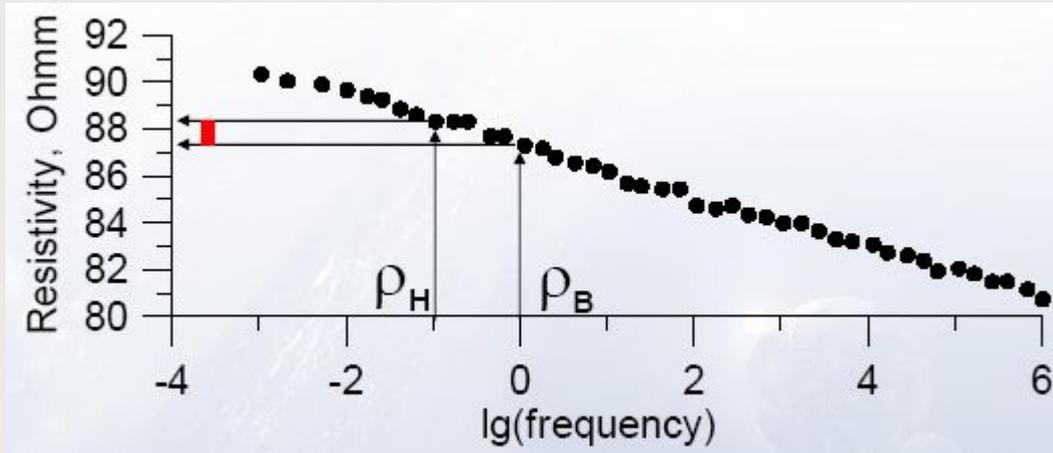
Было много разных попыток изучения спада: Sumi, венгры (Диапир), Бертин и Лоеб, Комаров и др.

ВП в частотной области:
частотный эффект, процентный
частотный эффект: PFE, сдвиг фаз: β



Первые два - по амплитудам на двух частотах, третий - фазовый.

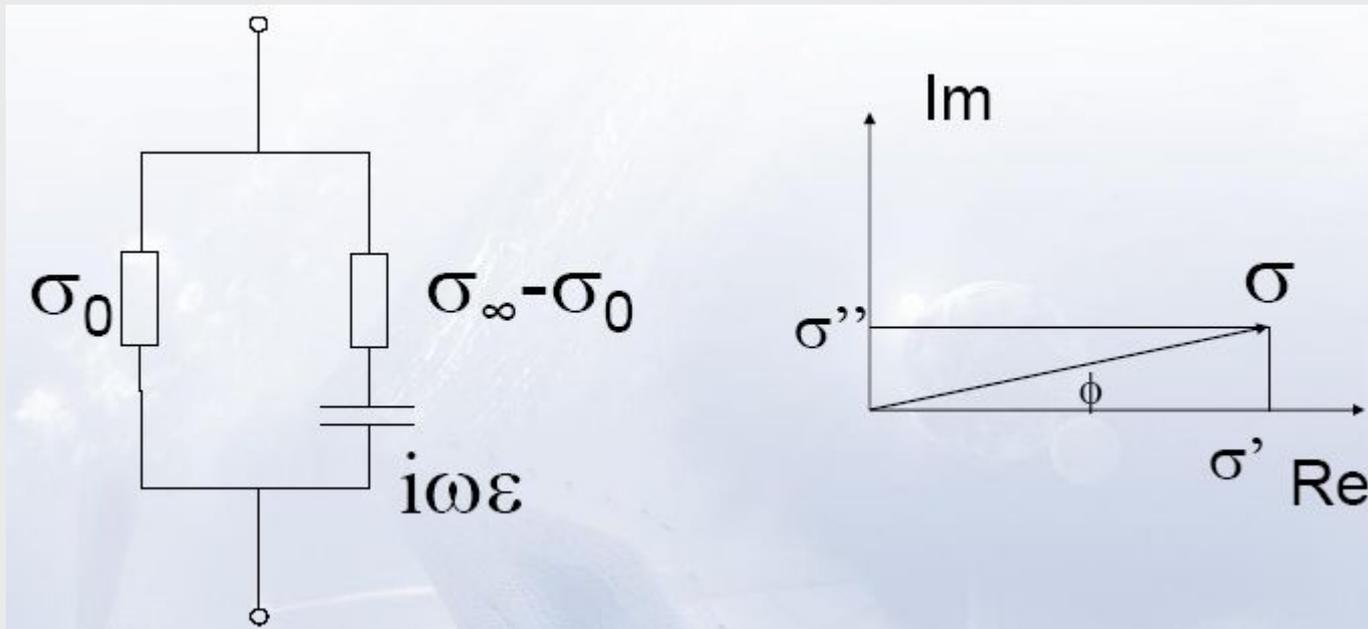
Частотный эффект: FE



$$FE = \frac{\rho_H - \rho_B}{\rho_H}$$

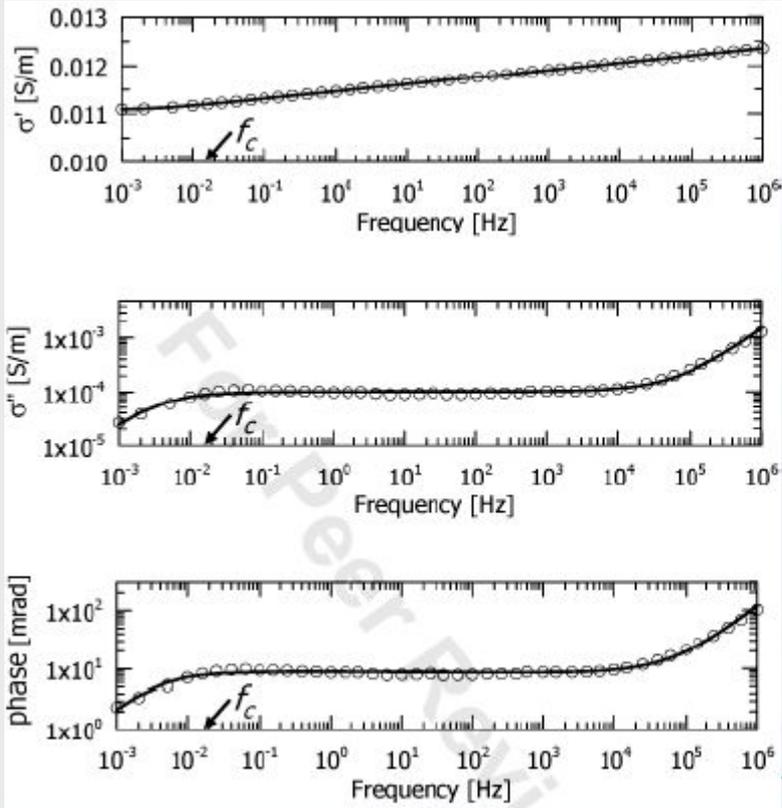
Сопротивление с ростом частоты медленно убывает, или проводимость возрастает. Разница частот для FE, PFE - обычно в два-три раза.

Электропроводность в частотной области



Комплексная проводимость складывается из реальной и мнимой частей. Отметим, что мнимая часть проводимости - это поверхностная проводимость, а реальная часть проводимости - это электролитическая проводимость (почти). Эти термины используются давно, их связь с параметрами ВП представляет интерес.

Спектры (от частоты)



Kruschwitz et al., 2010

Измерения на образце
песчаника Berea
насыщенного раствором
570 мг/л NaCl

Обращает на себя внимание **сходство** зависимостей **σ''** и **фазы** от частоты. А σ'' это поверхностная проводимость (σ' - электролитическая проводимость)

Соответствие параметров ВП

Ненормированные:

$$m \sim FE \sim \varphi$$

Все пропорциональны или сравнимы

Для пород сильно зависят от солености поровой влаги – убывают с ростом солености.

Заряжаемость -
частотный
эффект - фаза

Нормированные или 'чистые' полевые параметры

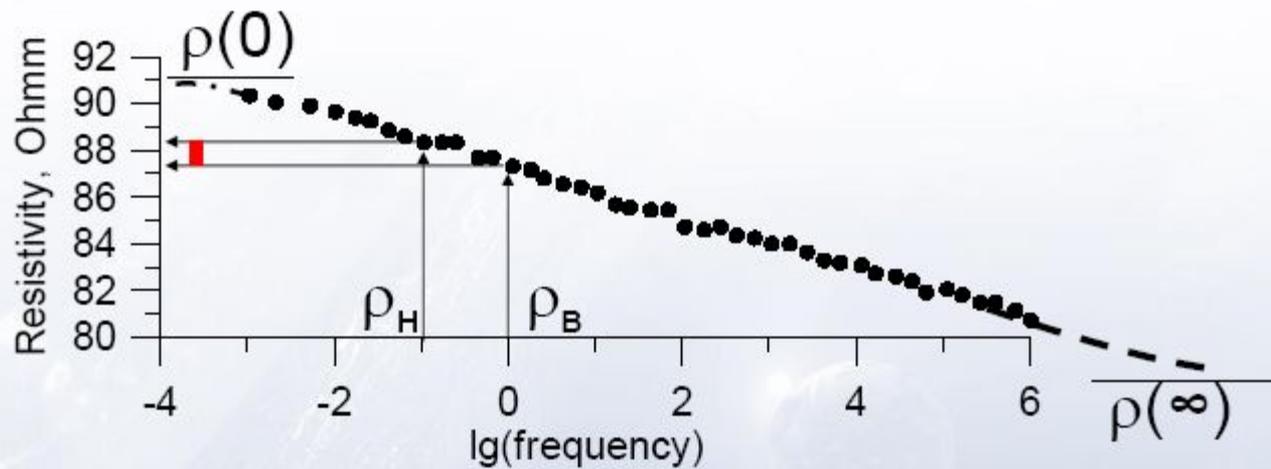
$$m_n = \frac{m}{\rho} \sim MF = \frac{FE}{\rho} \sim \sigma''$$

Для пород слабо зависят от минерализации,
медленно возрастают до насыщения (?)

Металл -
фактор -
мнимая часть
КС -
поверхностная
проводимость

Идея металл-фактора m_n очень старая, она раньше применялась в рудной ВП, а теперь оказалась полезна и в гидрогеологических приложениях.

Идеальный параметр интенсивности



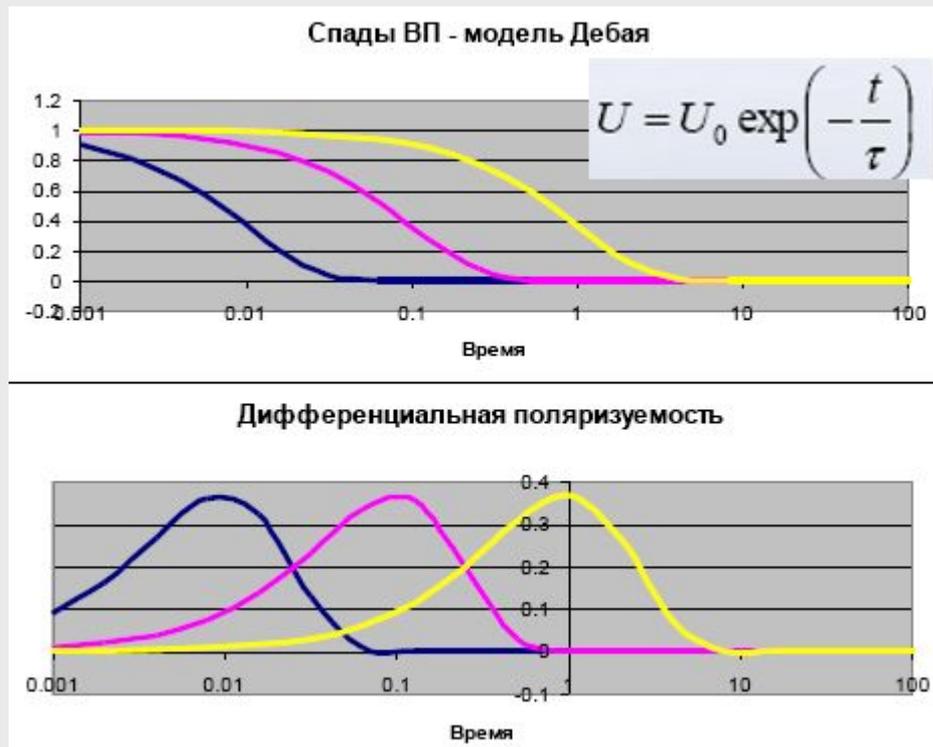
Стационарная поляризуемость – the total chargeability

$$M = \frac{\rho(0) - \rho(\infty)}{\rho(0)} = \frac{\sigma(\infty) - \sigma(0)}{\sigma(\infty)}$$

Сложности – в определении асимптотических значений

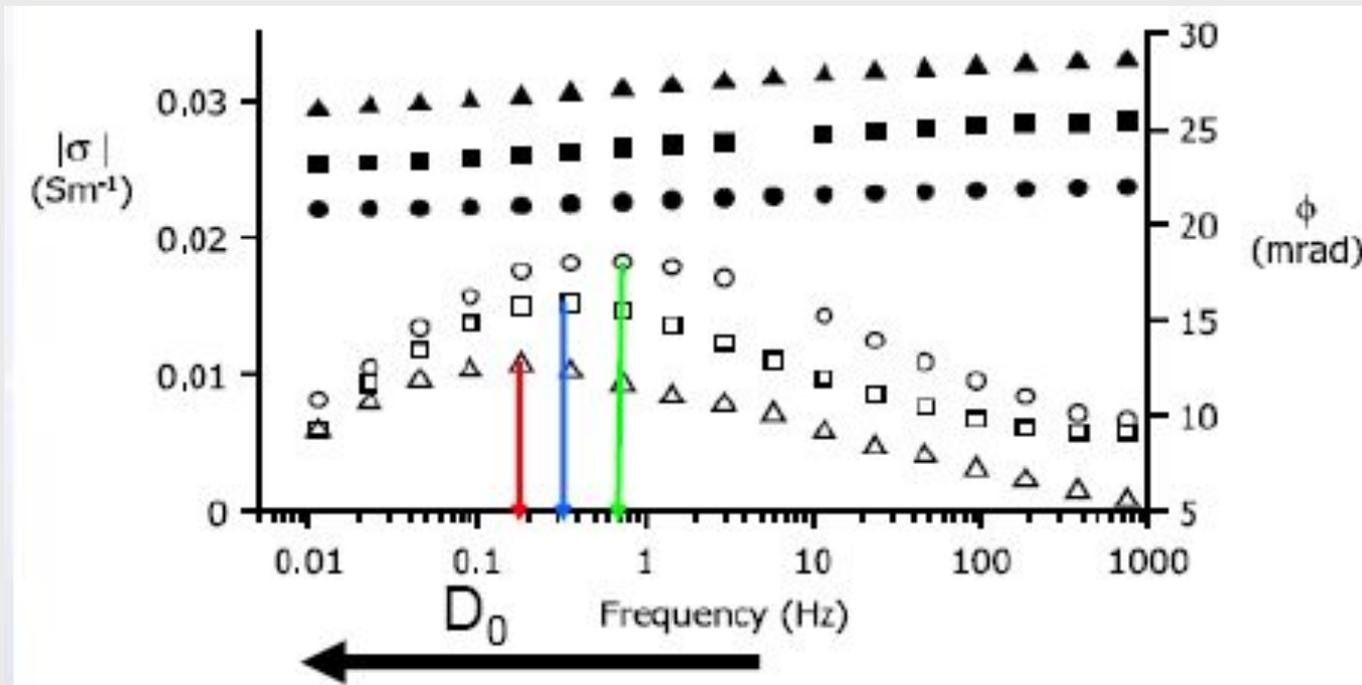
$\rho(0)$ - на нулевой частоте, а мы часто используем переменный ток, $\rho(\infty)$ - асимптота на очень высокой частоте, еще сложнее из-за индукции.

Характеристика длительности ВП - постоянная времени τ



Спад ВП по логарифму времени (амплитуда и производная спада ВП по логарифму времени) - важный параметр - постоянная времени τ .

Увеличение размера пор D_0



Binley et al., 2005. Положение максимума фазовой характеристики связано с размером пор (Pore throat - горлышко). Вверху - амплитудные характеристики, внизу - фазовые. Максимум правее - тонкозернистая порода, максимум левее - крупнозернистая порода

Немного истории (по Zonge)

Компания Ньюмонт в 1946 г. возродила интерес к использованию метода ВП. С этого времени активность резко росла на протяжении более 30 лет, как в теории, так и на практике. (Сигел (Seigel), Уайт (Wait), Колетт (Collett), Блейл (Bleil), Мэдден и Маршал (Madden and Marshall), Фрэйзер (Fraser) и Вард (Ward), Халлоф (Halloy) и Патерсон (Patterson) внесли свой вклад в ВП. В России В.А.Комаров и его антагонист А.С.Поляков.

Югославский геофизик Суми (Sumi), может быть, был одним из первых, кто изучил возможность разделения типов минерализации по форме спада ВП во временной области в начале 60-х гг. Потом были публикации венгерских геофизиков, создана аппаратура Диапир - анализ спада ВП. Зонге (Zonge) ввел идею комплексного сопротивления. Пелтон (Pelton) представил обоснование для использования модели Коль-Коль (Cole-Cole) как основу анализа кривых спада ВП.

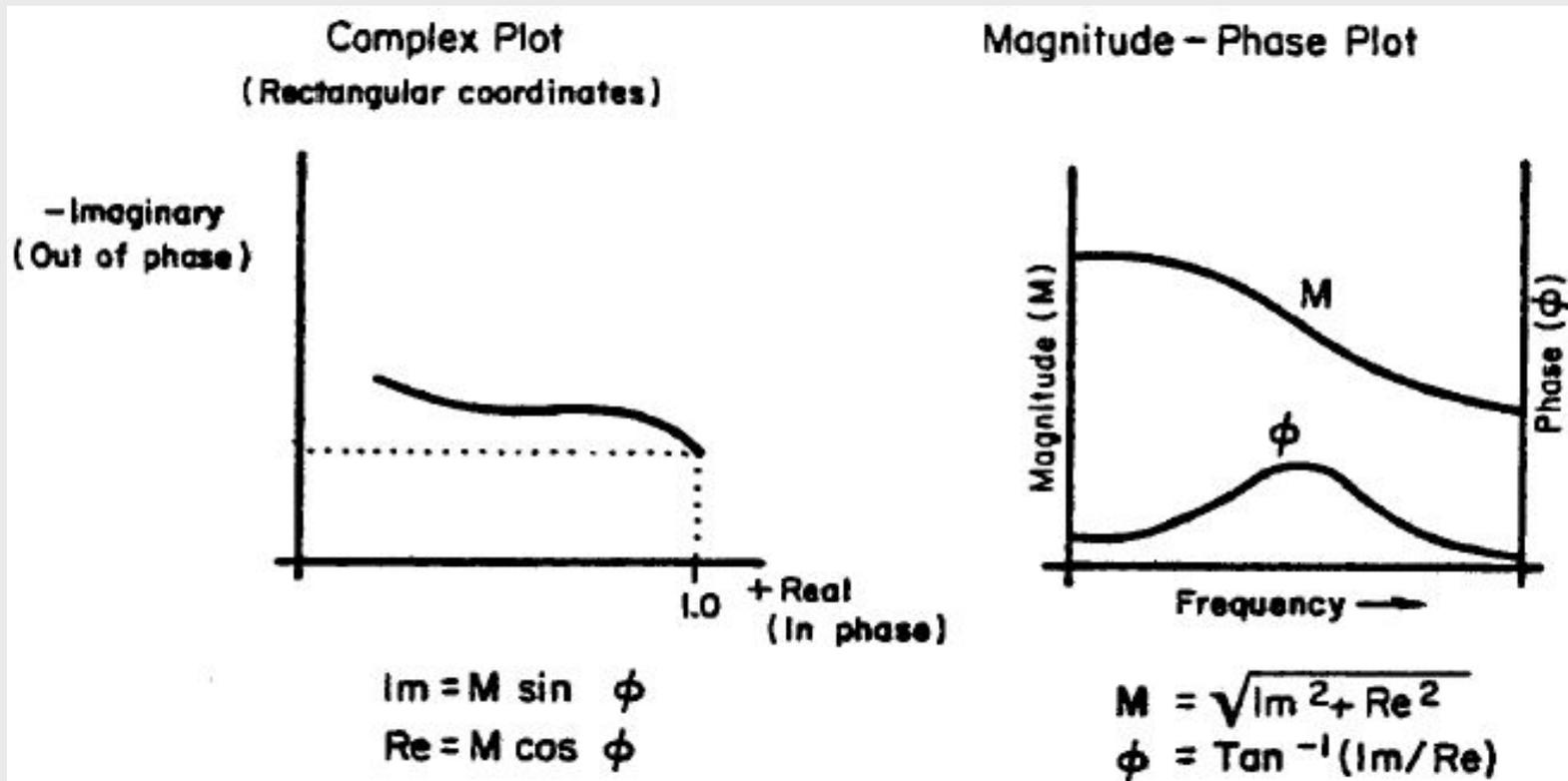
Основной причиной для разработки формой Zonge многочастотного ВП (комплексного сопротивления или спектрального ВП) были две идеи; удаление эффектов ЭМ индукции из данных ВП, и распознавание источника аномалии ВП. Удаление эффектов ЭМ индукции было успешно достигнуто (Zonge в 1973 - секрет фирмы), и продолжается работа по распознаванию типа минерализации по ВП. Почему важно распознавание типов минерализации. Из 200 аномалий ВП в рудных районах, лишь одна имеет рудную природу, а остальные вызваны графитом и пиритом.

Немного из Zonge об индукции

Глава фирмы Zonge (Ken Zonge) в статье "CR method" говорит, что измерения на переменном токе сопровождаются тремя типами coupling effects (индукции): от технических (металлических) предметов в земле - cultural coupling, от слоистости земли (layered earth coupling) (эффект связан с сопротивлениями слоев) и от (galvanic coupling). Еще разделяют гальванический и индуктивный coupling. Индуктивный coupling является функцией длины проводов, частоты поля и сопротивления среды. Поэтому нередко применяют частичные решения по уменьшению такого coupling. Используют установки с минимальной индукцией (MN перпендикулярно АВ) или выбирают самые низкие частоты (теряя производительность) или используют данные нескольких частот, чтобы привести их к нулевой частоте.

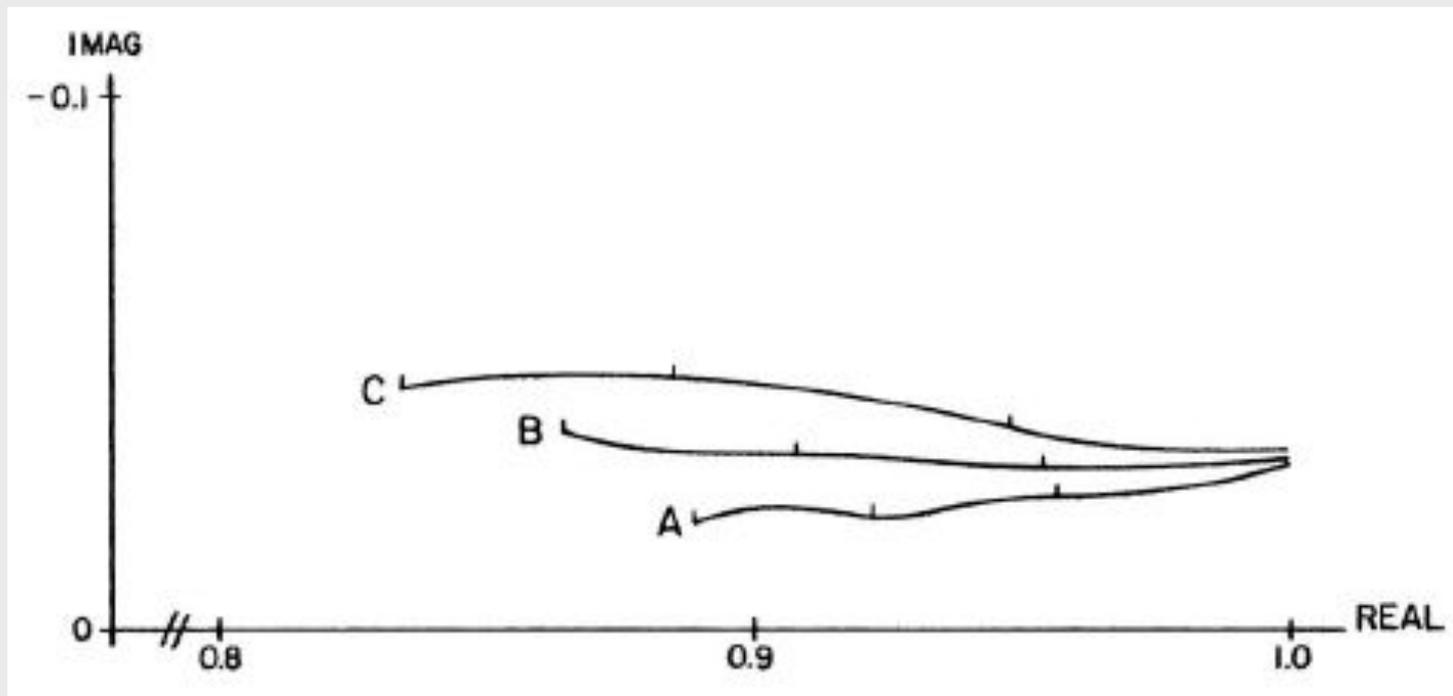
Но для разделения эффектов от разных минералов нужны спектры частот, т.е. и более высокие частоты. В фирме Zonge разработали метод Z.E.R.O. в котором итеративным методом получают теоретическое решение устранения coupling (индукции). Детали этого решения являются секретом фирмы, но пользователи в течение 30 лет остаются довольны. По Зонге спектральное ВП это комплексное сопротивление лишённое влияния индукции (coupling). Иногда измерения выполняют на основной частоте, а также третьей и пятой гармонике (возможны иные варианты трехчастотных измерений), как в МЭРИ.

Формы представления комплексных характеристик



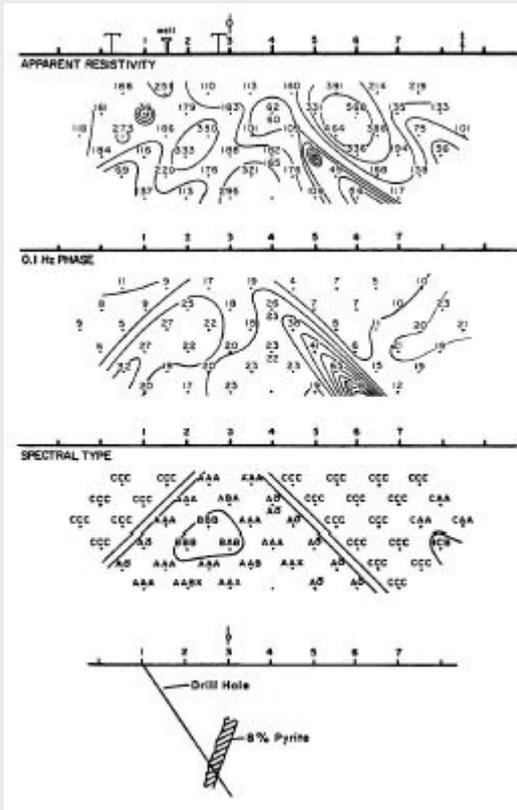
Слева комплексный график в координатах Re-Im; справа амплитуда и фаза от частоты. В поле измеряют амплитуду и фазу, но комплексный график в координатах Re-Im считают более удобным для работы с данными ВП.

Сравнение трех спектров



Сравнение спектров для пород содержащих пирит, халькозин и халькопирит (A); только пирит (B); хлоритизированный биотит (C).

Рудное тело под трубопроводом

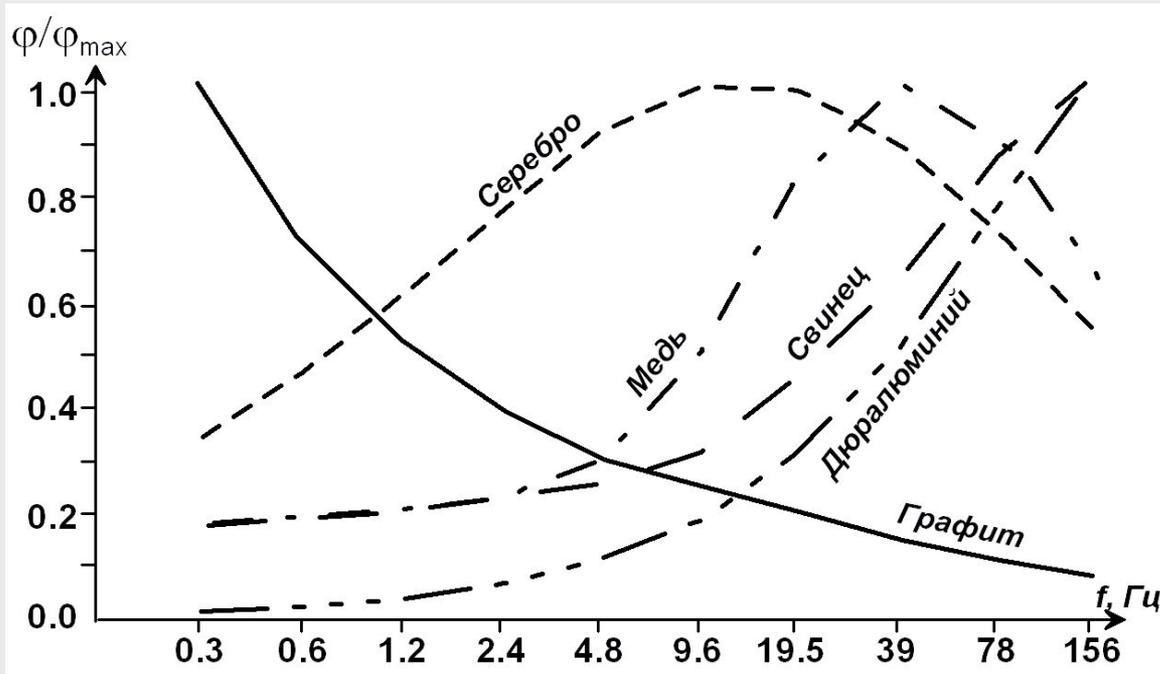


Результаты метода CR для сульфидного рудного тела залегающего под трубопроводом. Один электрод точно над трубой (влияние максимально).

Возможно, что наиболее важным преимуществом измерения комплексного сопротивления является способность удалять ЭМ индукцию из данных ВП. Независимо от того, сможет ли кто-то отличить экономически интересные и неинтересные аномалии ВП, способность отличить индуктивные аномалии от вызванных сульфидами является самой ценной возможностью анализа данных комплексного сопротивления.

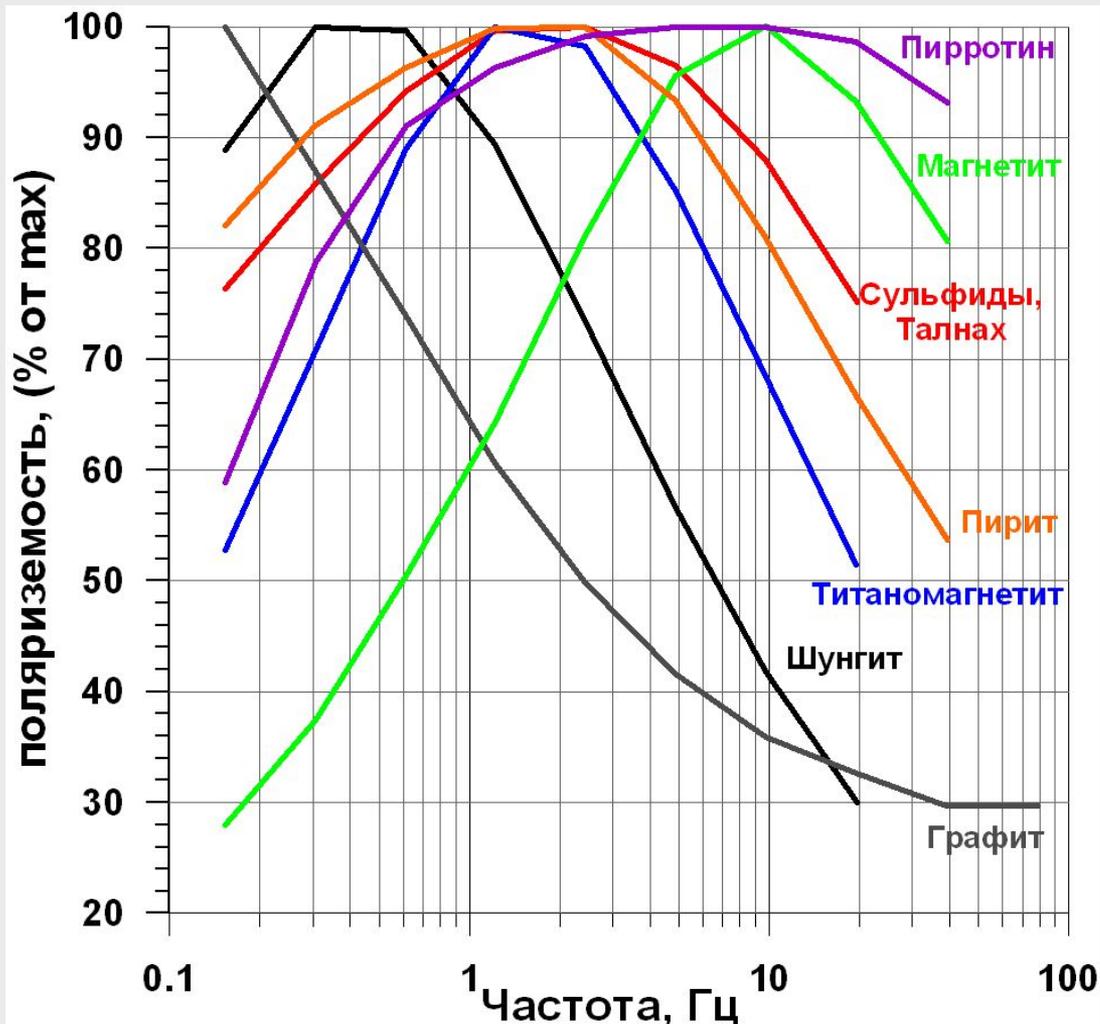
Аналогично параметр ДФП в аппаратуре МЭРИ - главное в ДФП - способность удалять ЭМ индукцию из данных ВП.

Частотные характеристики ВП (Россия)



Относительные фазово-частотные характеристики над металлами (по В.И. Лемecu, 1980 г.). Графит резко отличается от металлов по ФЧХ.

Фазовые частотные характеристики ВП для различных пород (по В.А. Куликову, ООО "Северо-Запад").



Эта картинка показывает, что спектральное ВП существует, и в России для него есть аппаратура Астра - МЭРИ. Это лабораторные измерения, но есть и полевые. Графит резко отличается от других минералов по ФЧХ.

Спектральная ВП (SIP)

Метод СВП относительно новый, требуется особая аппаратура, не так много примеров полевых работ, больше лабораторных результатов. Иное название SIP это комплексное сопротивление (complex resistivity - CR). Это комплексная величина, имеющая действительную и мнимую компоненты или амплитуду и фазу, которые можно измерить отдельно. Измерения проводят в широком интервале частот: 0.01-1000 Гц.

Нерудное направление. Электропроводность σ в капиллярах ионопроводящих пород можно разделить на электролитическую σ' (водного раствора) и поверхностную σ'' (пленочную) проводимость ($\sigma = \sigma' + i\sigma''$). Действительная часть CR отражает электролитическую σ' , а мнимая - поверхностную σ'' проводимость. **Ф.Борнер** (2006) показал, что σ'' связана с **относительной поверхностью пор** (отношение площади поверхности к объему поры), а S_{por} связана с **гидравлической проводимостью** K (коэффициентом фильтрации).

Поэтому одно направление CR или SIP это оценка фильтрационных свойств грунта. Второе направление изучение нефтяных загрязнений, в которых биодеградация приводит к увеличению σ'' без изменения σ' .

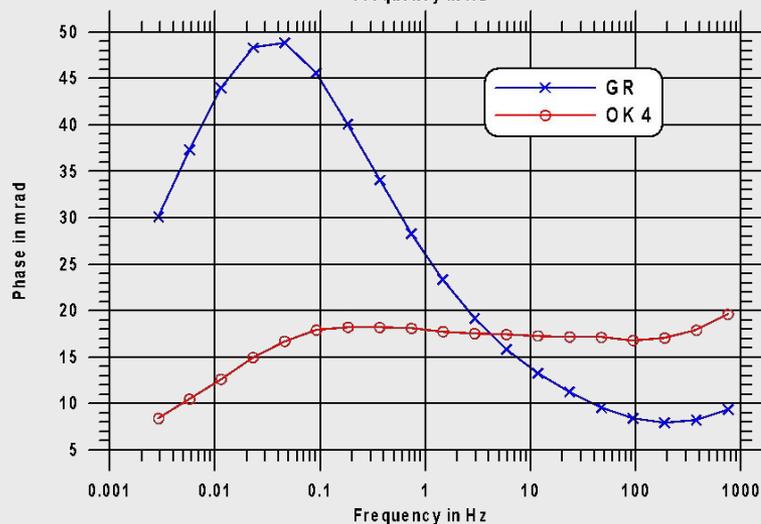
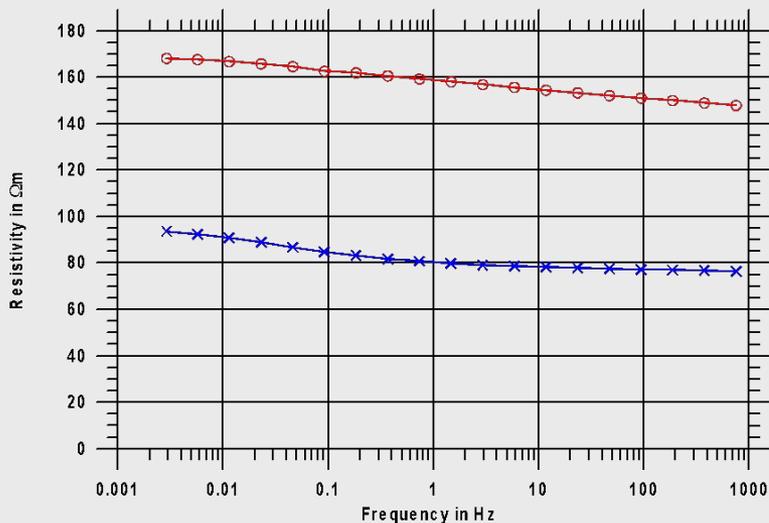
$$S_{por} = b\sigma'',$$

$$K = \frac{a}{F(S_{por})^c},$$

Число публикаций на Западе по СВП на безрудных грунтах растет как лавина. Это перспективы, будущее метода ВП, нужен переход к массовым измерениям, основная трудность - индукция.

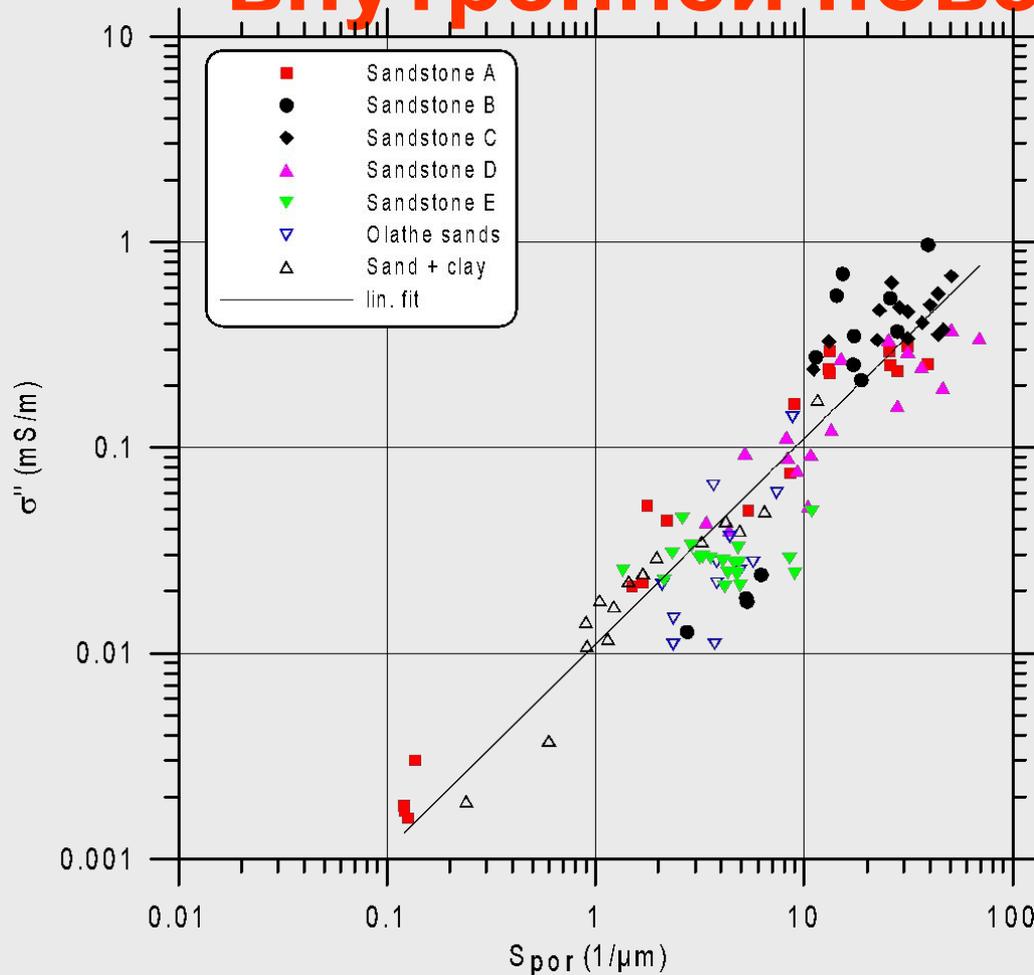
Амплитудные и фазовые частотные спектры

Как правило, амплитудные спектры оказываются менее выразительными, чем фазовые (Именно в фазовых спектрах сильнее проявляется влияние ВП).



Данные А. Веллера, Германия

Связь мнимой части проводимости и эффективной внутренней поверхности S



$$S_{por} = \frac{A_{por}}{V_{por}}$$

$$s'' = 0.01 S_{por}$$

$$f = 1 \text{ Hz,}$$

$$s_w = 100 \text{ mS/m}$$

Прямая пропорциональность

По А. Веллеру, Германия

Связь поляризуемости и площади внутренней поверхности

- Определение нормализованной поляризуемости (заряжаемости) по Lesmes & Frye (2001):

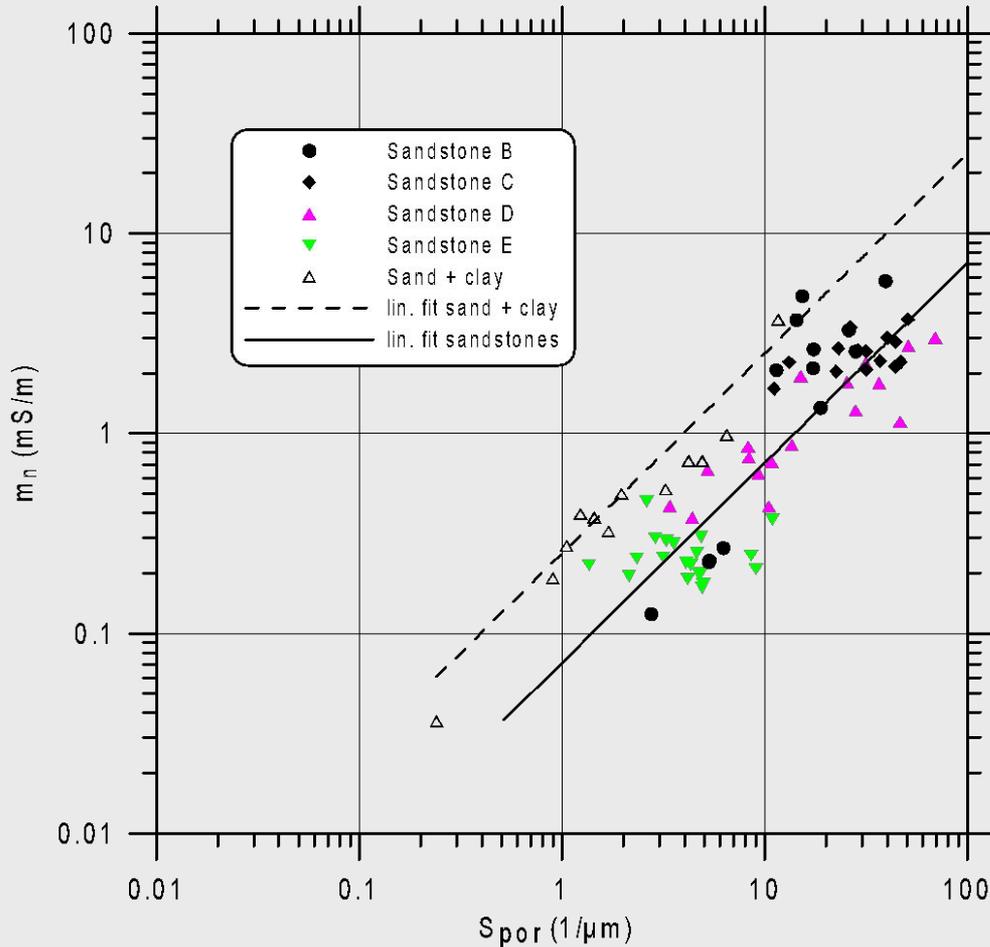
$$m_n = \frac{m_t}{\rho_0} = m_t \sigma_o$$

Раньше так выполняли расчет металл-фактора

- Преимущество: нормализованная поляризуемость не зависит от сопротивления (DC) и пропорциональна мнимой части проводимости.
- нормализованная поляризуемость пропорциональна удельной поверхности порового пространства S_{por}

- Чем меньше горлышко, тем меньше постоянная времени и коэффициент фильтрации – инструмент τ
- Чем больше мнимая часть электропроводности, тем больше удельная поверхность и тем меньше коэффициент фильтрации – инструмент σ''

Сходство нормированной поляризуемости m_n и мнимой части проводимости σ'' (ранее)



Нормализованная поляризуемость m_n и относительная поверхность пор (прямая пропорциональность)

Для песчаников
 $m_n = 0.072 S_{por}$

Для песчанистых смесей
 $m_n = 0.17 S_{por}$

@ $\sigma_w = 100 \text{ mS/m}$

Отсюда вывод о сходстве m_n и σ'' , получаемых из временных и частотных измерений СВП.

По А. Веллеру, Германия

Связь между параметрами ВП и поверхностной проводимостью

Модель проводимости в глинистых породах

параллельное включение:

$$\sigma^* = \sigma_{el} + \sigma_{surf}^*$$

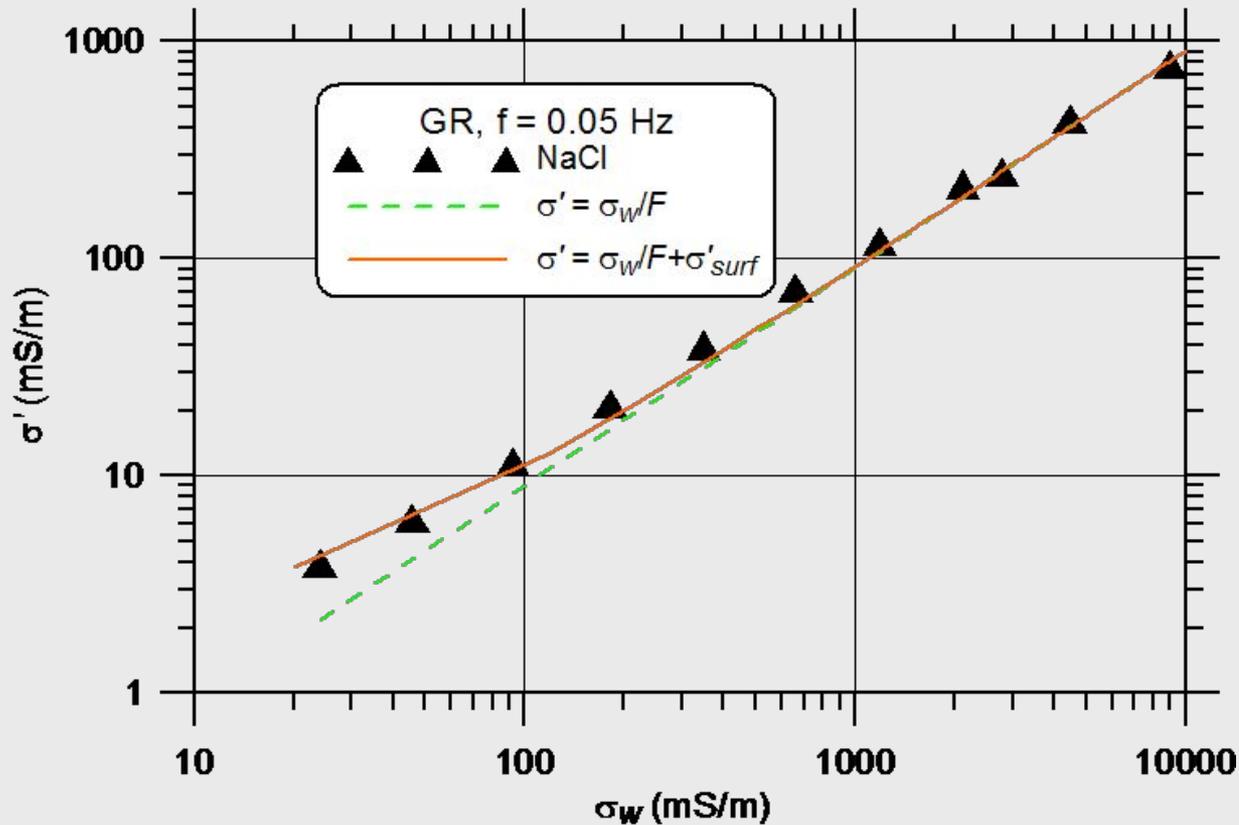
реальная часть проводимости:

$$\sigma' = \frac{1}{F} \sigma_w + \sigma'_{surf}$$

мнимая часть проводимости:

$$\sigma'' = \sigma''_{surf}$$

С учетом и без учета поверхностной проводимости



$$\sigma'(\sigma_w) = \frac{1}{F} \sigma_w$$

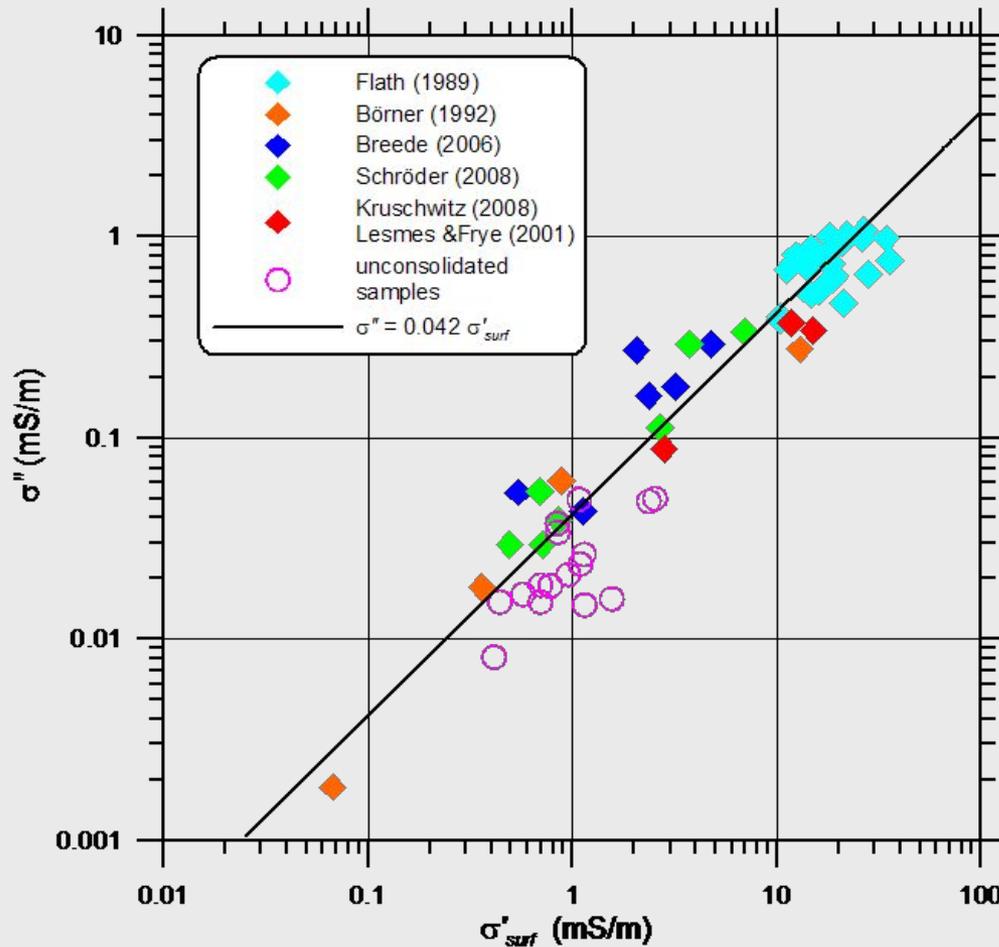
$$\sigma'(\sigma_w) = \frac{1}{F} \sigma_w + \sigma'_{surf}$$

По А. Веллеру, Германия

А. Веллер использовал несколько баз данных для разной солености

- Dianne Flath (1989): 24 shaly sandstone samples
- Frank Börner (1992): 4 sandstone samples
- Lesmes and Frye (2001): 1 sandstone sample
- Katrin Breede (2006): 6 sandstone samples
- Henning Schröder (2008): 7 sandstone samples
- Sabine Kruschwitz (2008): 2 sandstone samples
- Rutgers University (new): 16 unconsolidated samples

Корреляция проводимостей



Коррелируют мнимая часть комплексной проводимости и поверхностная проводимость

$$R^2 = 0.913$$

По А. Веллеру, Германия

Нормализованная поляризуемость и площадь поверхности

Andreas Weller¹, Lee Slater², Sven Nordsiek¹, and Dimitrios Ntarlagiannis²

Авторы считают свои результаты аналогом закона Арчи для ВП

$$m_n = c_s(S_{\text{por}})$$



$$\rho = F\rho_w$$

c_s - 'specific polarizability per unite surface-to-pore volume'

Чем больше удельная поверхность, тем ниже коэффициент фильтрации!

m_n - нормализованная заряжаемость (поляризуемость)

Возможности и перспективы СВП

По Титову К.В.:

Возможность различить глину и водоносные горизонты с солоноватой водой

Оценка текстуры и коэффициента фильтрации

Оценка водонасыщенности, гидрофильность - гидрофобность

Оценка концентрации электропроводящих минералов, текстуры измененных пород, минерального состава

Можно ли измерять СВП в поле?



Преобладают лабораторные измерения в соотношении 50 к 1

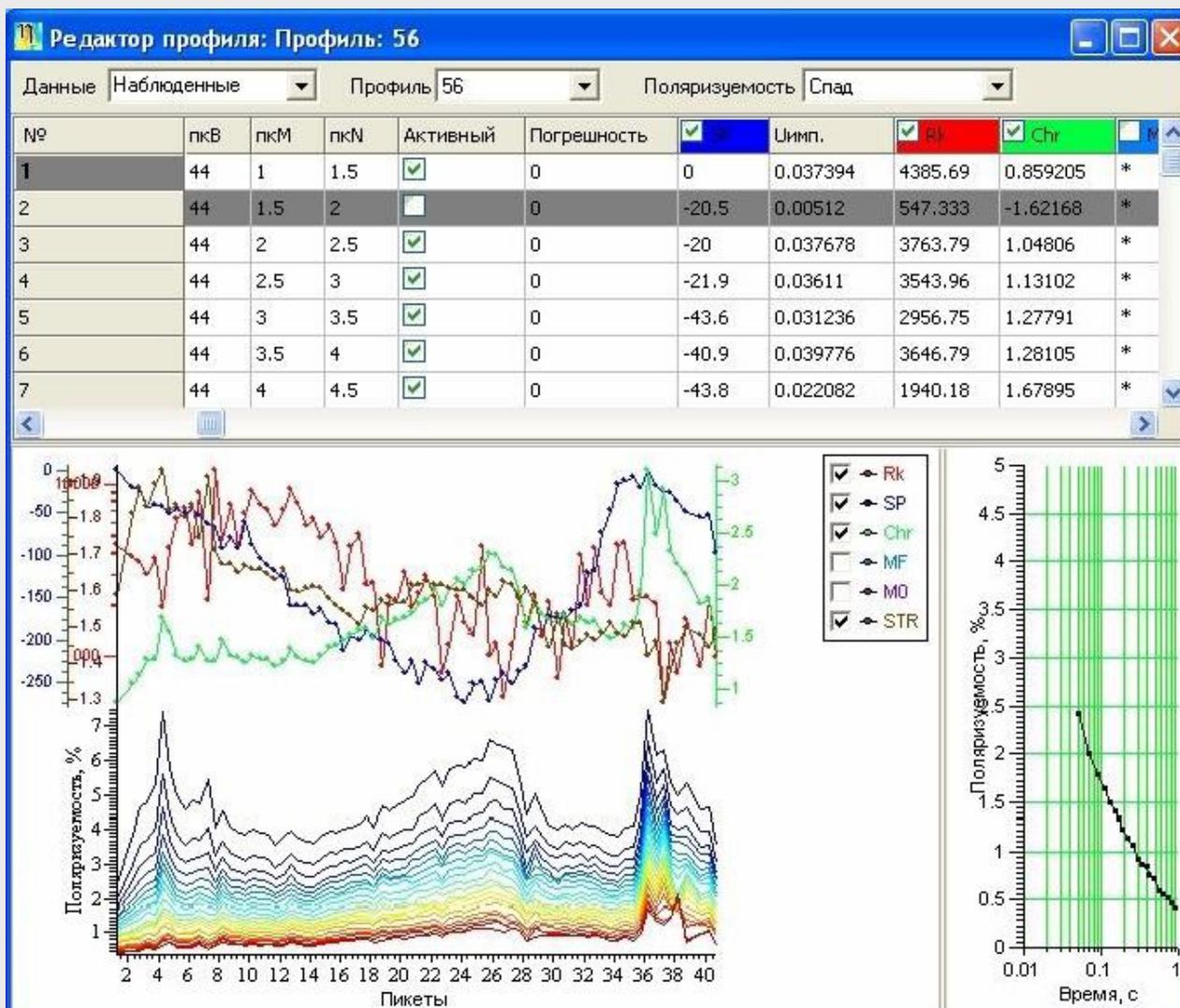
Многоканальная аппаратура СВП фирмы Radic Research (Radic, 2004), работающая в поле в Германии. Белые коробочки это устройства сбора информации, эта информация контролируется и оцифровывается перед пересылкой в компьютер по оптическому кабелю. Частотный режим.

Российская аппаратура для СВП



Российская аппаратура для СВП, с которой работает К.В.Титов. Временной режим.

Пример данных СВП (К.В.Титова)



Астра - МЭРИ



Особый случай - дифференциальный фазовый параметр (ДФП). Но можно определять и частотный эффект, металл-фактор, поляризуемость.

Немного философии

Комплексная величина сопротивления или проводимости имеет реальную (Re) и мнимую (Im) составляющие. Но часто эти части содержат одну и ту же информацию, только графически этого не видно, а вычислительно можно обнаружить.

Амплитудную кривую МТЗ можно пересчитать в фазовую кривую, а можно просто измерить фазу.

Между амплитудной и фазовой кривой спектрального ВП тоже есть связь. Амплитудная кривая СВП в своей форме отражает больше сопротивление (или проводимость) среды, а фазовая - больше поляризационные свойства. Но оба вида информации есть и там и там. Поэтому Веллер и др. геофизики показывают, что разные параметры ВП (или СВП) связаны. Борнер показал, что в СВП есть информация о коэффициенте фильтрации, а Рыжов и Шевнин извлекают эту информацию из сопротивления грунта, сопротивления воды и зависимости сопротивления грунта от солености с помощью программы Рыжова Петрофизика.

Постепенно складывается понимание сходства многих параметров ВП.

Пока только ДФП и измеритель МЭРИ стоят особняком и это мешает включению ДФП в общее развитие метода ВП.

Что такое ДФП?

Формально, ДФП это
$$\Delta\varphi = \frac{\omega_{\text{выс}} \cdot \varphi(\omega_{\text{низ}}) - \omega_{\text{низ}} \cdot \varphi(\omega_{\text{выс}})}{\omega_{\text{выс}} - \omega_{\text{низ}}}$$

Бобачев показал, что ДФП это фаза ВП с небольшой добавкой

$$\varphi_2^{IP} \approx \varphi_1^{IP} + (\omega_2 - \omega_1) \frac{\partial \varphi_1^{IP}}{\partial \omega}$$

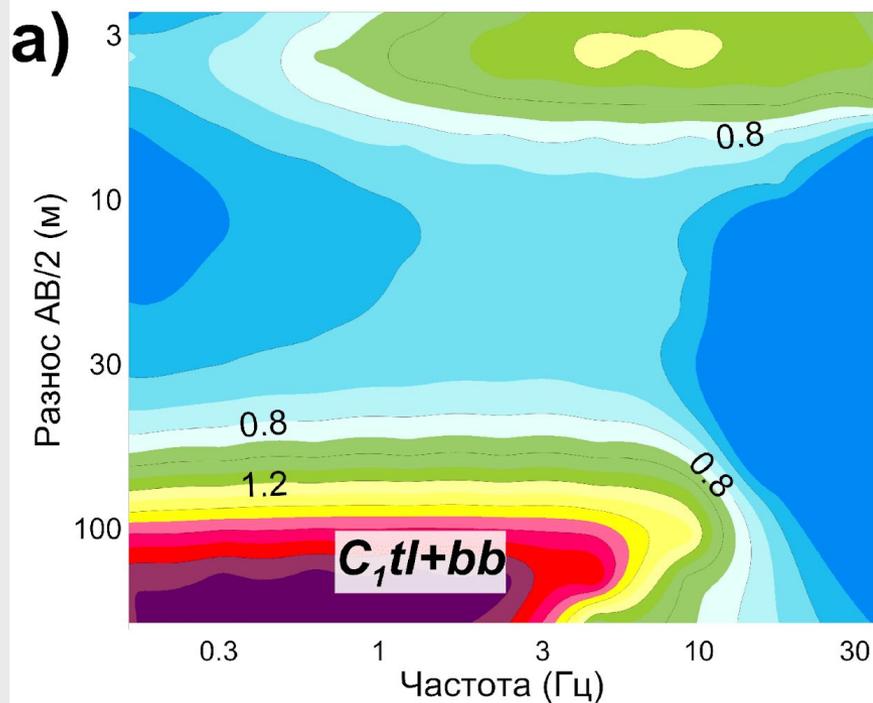
$$\Delta\varphi(\omega) = \frac{\omega_2 \varphi_1^{IP} - \omega_1 \left(\varphi_1^{IP} + (\omega_2 - \omega_1) \frac{\partial \varphi_1^{IP}}{\partial \omega} \right)}{\omega_2 - \omega_1} \approx \varphi^{IP}(\omega) - \frac{\partial \varphi(\omega)}{\partial \ln(\omega)}$$

Известная каждому студенту формула связывает ДФП и поляризуемость
 $\eta_k (\%) = - 2.5 \cdot \text{ДФП (градусы)}$

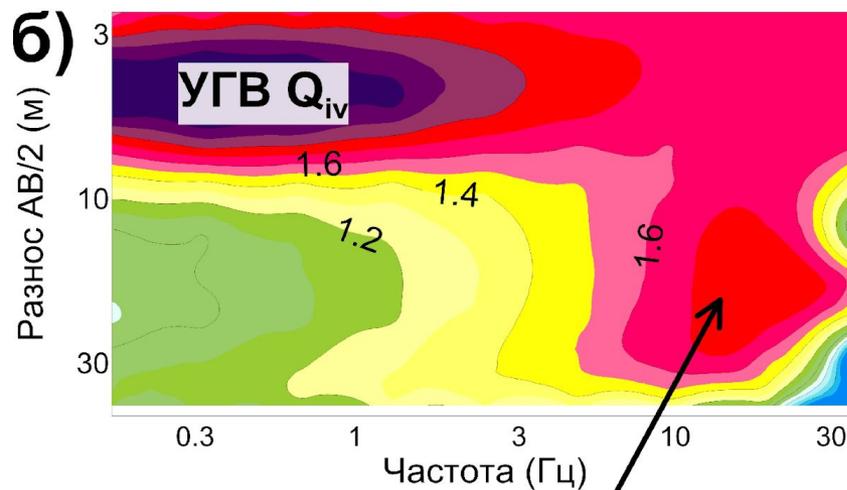
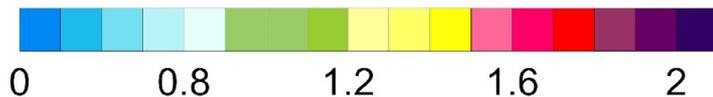
Формула статистическая, но таких формул немало в геофизике.

Результаты СВП с Астра-МЭРИ в Александровке

ВЭЗ-ВП в районе д. Александровка (Калужская область)

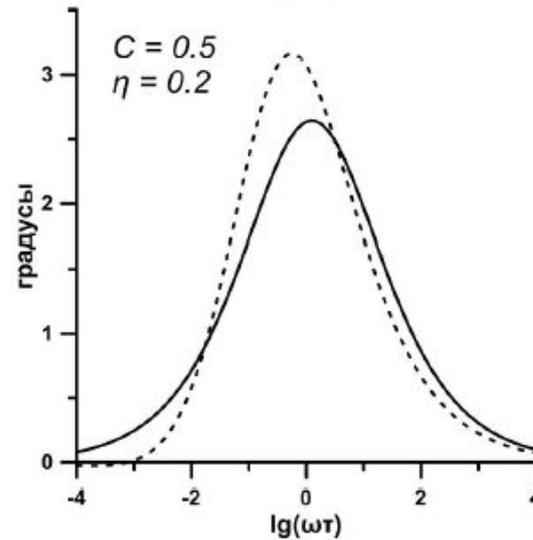
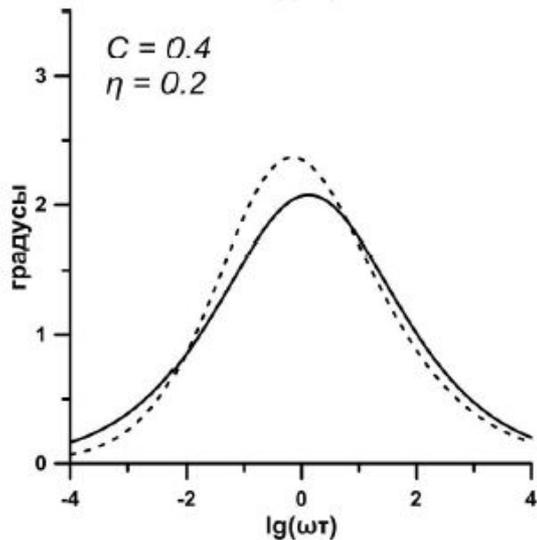
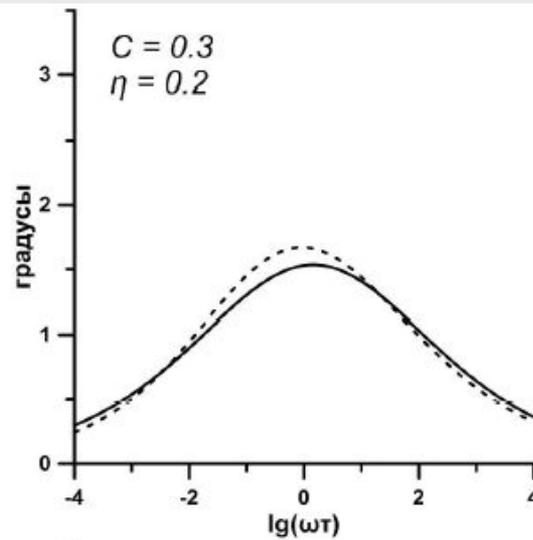
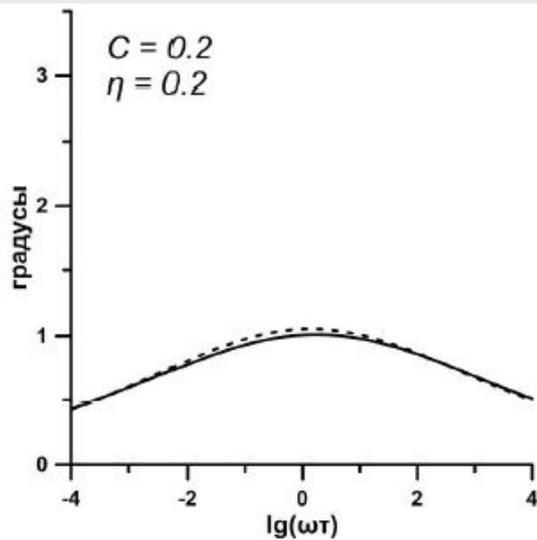


Кажущаяся поляризуемость (%)



Отложения палеодолины с высоким содержанием Fe

Никита Зорин (аспирант А.Г. Яковлева) показал, что:



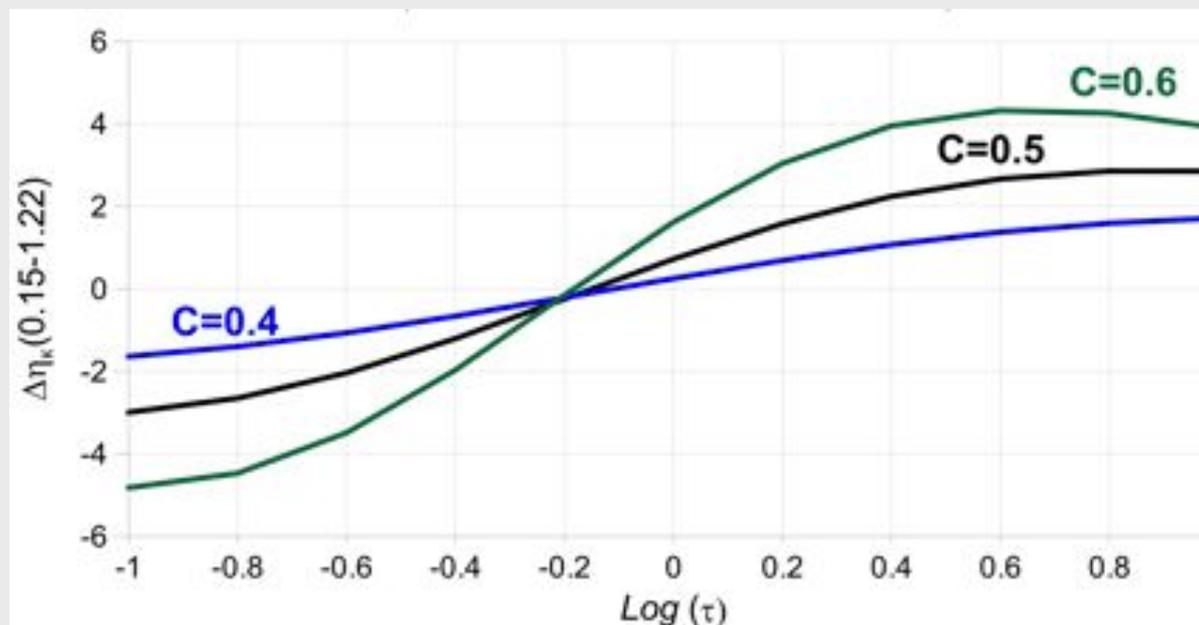
При малых значениях параметра C (временной параметр Коль-Коль) (кривая фазы ВП (сплошная линия) практически совпадает с кривой ДФП (пунктирная линия). С ростом растет кривизна графика фазы ВП, что приводит к большему расхождению последнего с соответствующим ему графиком ДФП. Значения параметра C на рисунке - от 0.2 до 0.5, а наиболее часто встречающиеся значения параметра C - от 0.2 до 0.35.

Что еще нужно ДФП?

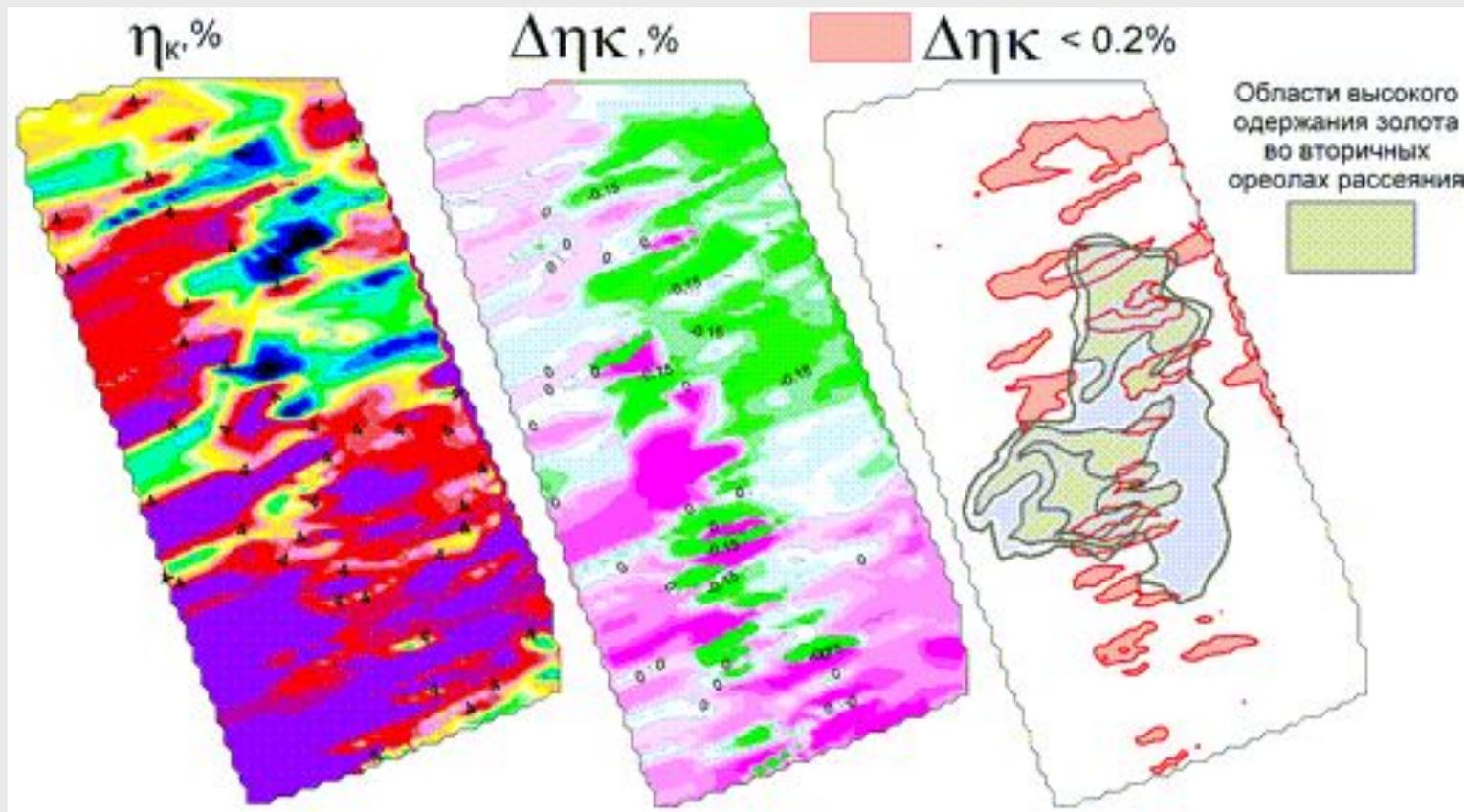
В комплексном сопротивлении измеряют действительную и мнимую части, в СВП - амплитуду и фазу. При измерении ДФП ограничиваются фазовым параметром, потому что основная нацеленность ДФП - рудная минерализация. Чтобы измерения с МЭРИ заняли свое место среди разных способов измерения ВП нужно, чтобы к ДФП (фазовому) был добавлен амплитудный параметр, тогда ДФП будет полноправным параметром ВП. Это, конечно, требует подключения теории, что начали А. Бобачев и Н. Зорин. Западная аппаратура СВП (Радик) делает первые шаги в поле, а МЭРИ давно работает в самых разных ситуациях (отличная аппаратура), но проблема МЭРИ и ДФП - слабое теоретическое обоснование и неясная связь с общепринятыми параметрами ВП.

Разность η_k на двух частотах

В качестве простого и надежного способа оценки временных характеристик вызванной поляризации можно использовать разность значений ДФП (или η_k) на двух частотах. Учитывая, что графики ЧХ ДФП практически симметричны, рабочие частоты можно подобрать таким образом, чтобы разница двух ДФП, рассчитанных на этих частотах, принимала отрицательное значение над одной породой и положительное над другой.



Пример золоторудного участка



Настройка частот и выбор разности η_k двух частот (0.61 и 1.22 Гц) дал хорошую корреляцию с ореолами золота. Это частично наука, а больше искусство, опыт, чутье. Небольшие отрицательные значения $\Delta\eta_k$ хорошо согласуются с высококонтрастной устойчивой аномалией золота. (Куликов, Яковлев, 2008). Эту методику Куликов применяет несколько лет и успешно.

Литература

- Титов К.В., профессор СПбГУ. Спектральная вызванная поляризация: физика, методика, интерпретация, перспективы. ИнжГео-2013, Геленджик. 153 стр.
- Weller A. Spectral induced polarisation on sandstones and sandy soils. Institute of Geophysics. Clausthal University of Technology. September, 2013. Лекция, МГУ.
- Zonge K. L., Hughes L. J. The complex resistivity method. 1980. Zonge Engineering & Research Organization, Inc. 32 pp.
- Börner, Schopper & Weller (1996): Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements, *Geophysical Prospecting* 44,583-601.
- Revil A., Leroy P., and Titov K. Characterization of transport properties of argillaceous sediments: Application to the Callovo-Oxfordian argillite. 2005. *Journal of geophysical research*, Vol. 110, B06202, doi:10.1029/2004JB003442.
- Titov K., Kemna A., Tarasov A., and Vereecken H. Induced Polarization of Unsaturated Sands Determined through Time Domain Measurements. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3:1160–1168.
- Weller, A.; Slater, L.; Nordsiek, S.; Ntarlagiannis, D. (2010): On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple datasets. *Geophysics* 75, No. 4.
- Weller, A.; Slater, L.; Nordsiek, S. (2013): On the relationship between induced polarization and surface conductivity: Implications for petrophysical interpretation of electrical measurements. *Geophysics* 78, No. 5.

Литература, 2

Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов. Геофизика, 2008. №6, с. 55-60.

В.А. Куликов, Н.И.Зорин, И.Т.Манжеева, А.Г.Яковлев. Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра. Геофизика (в печати).