

Аппаратурно-методический практикум по курсу электроразведки,
лабораторная работа на тему:
МЕТОД ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ВП).

Основы метода

Метод вызванной поляризации (метод ВП) основан на изучении вторичных электрических полей в земле. Появление метода ВП, так же как и метода сопротивлений, связано с именем *К. Шлюмберже*, взявшим соответствующий патент еще в 1912 г. Было обнаружено, что при протекании электрического тока в горных породах вследствие электрохимических и электрокинетических процессов возникают вторичные электрические заряды – этот эффект наблюдается в низкочастотном электрическом поле (до десятков Гц) в гетерогенных средах, состоящих из твердой и жидкой фаз.

Явление ВП связано с наличием двойного электрического слоя (ДЭС), самопроизвольно образующегося на фазовых границах (жидкость – твердое тело). В пределах некоторого объема суммарный заряд такого слоя равен нулю, и он не создает электрическое поле во внешней среде. После включения внешнего источника электрического поля на одних участках двойного электрического слоя начинают накапливаться заряды положительного, а на других – отрицательного знака. Таким образом, в среде образуются электрические диполи, которые и являются источниками поля ВП.

подавляющее число породообразующих минералов являются диэлектриками. В этом случае горная порода проводит электрический ток за счет ионов солей, растворенных в воде, наполняющей поры горной породы. В ионопроводящих горных породах ток течет только в жидкой фазе, и, следовательно, вектор напряженности электрического поля направлен параллельно двойному электрическому слою. При сужении пор на движение зарядов разного знака начинает по-разному сказываться двойной электрический слой (в широких порах ДЭС практически не оказывает влияния на их перемещение), в результате в областях изменения диаметра пор накапливаются электрические заряды. Явление вызванной поляризации в ионопроводящих горных породах проявляется достаточно слабо – поле вторичных зарядов, возникших при протекании электрического тока в земле, не превышает первых процентов от первичного поля. В случае наличия в горных породах минералов с электронным типом проводимости (*сульфиды, графит, магнетит* и некоторые другие) или металлических техногенных объектов твердая фаза уже не является диэлектриком, и ток течет поперек двойного электрического слоя. При этом идут гораздо более интенсивные электрохимические и электрокинетические процессы и поле вторичных источников, возникающих на границе твердой и жидкой фазы, может составлять десятки процентов от первичного поля.

Для ионопроводящих пород или в случае вкрапленных руд с электропроводящими минералами имеет место **объемная поляризация** вещества. Для массивных руд или в случае техногенных металлических объектов источники поля ВП возникают на границе тела, обладающего электронной проводимостью, и тогда речь идет о **поверхностной поляризации**.

Основная область применения метода ВП – поиск и разведка рудных залежей, изучение техногенных металлических объектов. Аномалии ВП проявляются также в зоне капиллярной каймы над подземными водами. Кроме того, химические процессы, связанные с наличием углеводородов в горных породах, могут приводить к образованию минералов с электронной проводимостью, что открывает перспективы использования ВП как для поиска месторождений углеводородов, так и для решения экологических задач при нефтяных загрязнениях.

Методика

Измерения ВП обычно проводятся на таких же четырехэлектродных установках, что и в методе сопротивлений, например АМNB (рис. 1).

При выполнении профилирования методом ВП часто применяется установка срединного градиента (СГ). Эта установка существенно снижает трудозатраты, позволяя с одного положения питающих электродов проводить наблюдение по одному или нескольким профилям, находящимся в средней трети линии АВ. Для повышения производительности работ часто используется многоканальная измерительная аппаратура, позволяющая одновременно регистрировать сигнал на нескольких линиях MN.

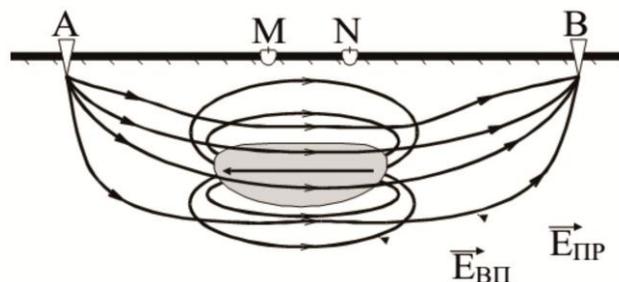


Рис. 1. К методике измерения

Особенность метода вызванной поляризации по отношению к методу сопротивлений заключается в том, что поле ВП примерно на два порядка меньше величины первичного поля, т.е. приходится регистрировать сравнительно слабые сигналы. Для повышения соотношения сигнал-помеха в методе ВП:

1. В линию АВ пропускается ток большей силы, чем в методе сопротивлений.
2. Используются установки с достаточно большими линиями MN.
3. В измерительной линии используются неполяризующиеся электроды.

Измерения вызванной поляризации проводятся с помощью **импульсной, амплитудно-частотной и фазовой** методик. Рассмотрим их подробнее.

Импульсные измерения.

Через питающие электроды АВ в течение некоторого времени пропускается электрический ток (рис. 2а). Если измерения проводятся над неполяризующейся средой, то сигнал в приемной линии MN будет почти таким же по форме, как и сигнал в питающей линии, осложненный лишь в местах включения и выключения индукционными искажениями от вторичных токов в среде (рис. 2б)¹.

Если в разрезе присутствуют поляризующиеся объекты, картина несколько усложнится (рис. 2в). После включения тока среда начинает заряжаться, и поле вызванной поляризации нарастает. Затем процесс вызванной поляризации выходит на насыщение, и разность потенциалов в приемной линии MN перестает меняться. После выключения тока поле ВП спадает по тому же временному закону, по которому оно нарастало при включении. В моменты скачкообразного изменения тока накладываются еще и индукционные эффекты (результатирующие кривые показаны на рисунке штрихом).

Измерение поля вызванной поляризации проводится на одном или нескольких временах задержки Δt после выключения тока в линии АВ. В принципе возможна регистрация явления вызванной поляризации и во время пропускания тока, однако такие наблюдения недостаточно точны, поскольку мы наблюдаем поле ВП на фоне первичного поля, которое, существенно больше его по величине. В качестве меры интенсивности процесса ВП

¹ Напомним, что связанные с индукцией эффекты являются полезным сигналом в методе ЗСБ (см. соответствующую разработку), но при работах методом ВП представляют собой основную помеху. В свою очередь, поляризационные эффекты могут внести значительные искажения в результаты ЗСБ.

используется поляризуемость η , которая рассчитывается как отношение напряженности поля вызванной поляризации к напряженности поля во время пропускания тока:

$$\eta = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}(\Delta t)}{\Delta U_{\text{пр}}} \cdot 100\%$$

Очевидно, что поляризуемость зависит от времени Δt задержки момента измерения поля ВП с момента выключения тока, а также от времени пропускания тока (в случае, если процесс ВП не вышел на насыщение).

Для ионопроводящих горных пород время зарядки, а, соответственно, и разрядки составляет первые секунды. В случае присутствия электропроводящих включений это время может увеличиваться до нескольких минут и более. Время пропускания тока стараются выбирать из условия полной зарядки среды, и в то же время оно не должно быть слишком большим, чтобы не снижать производительность работ. Обычно оно составляет от 10 секунд до минуты. Время задержки Δt должно быть достаточно большим, чтобы можно было пренебречь индукционными искажениями, но и достаточно малым, чтобы эффект ВП был все еще хорошо выражен (рис. 2в). В отечественной электроразведке Δt обычно берется равным 0.5 сек.

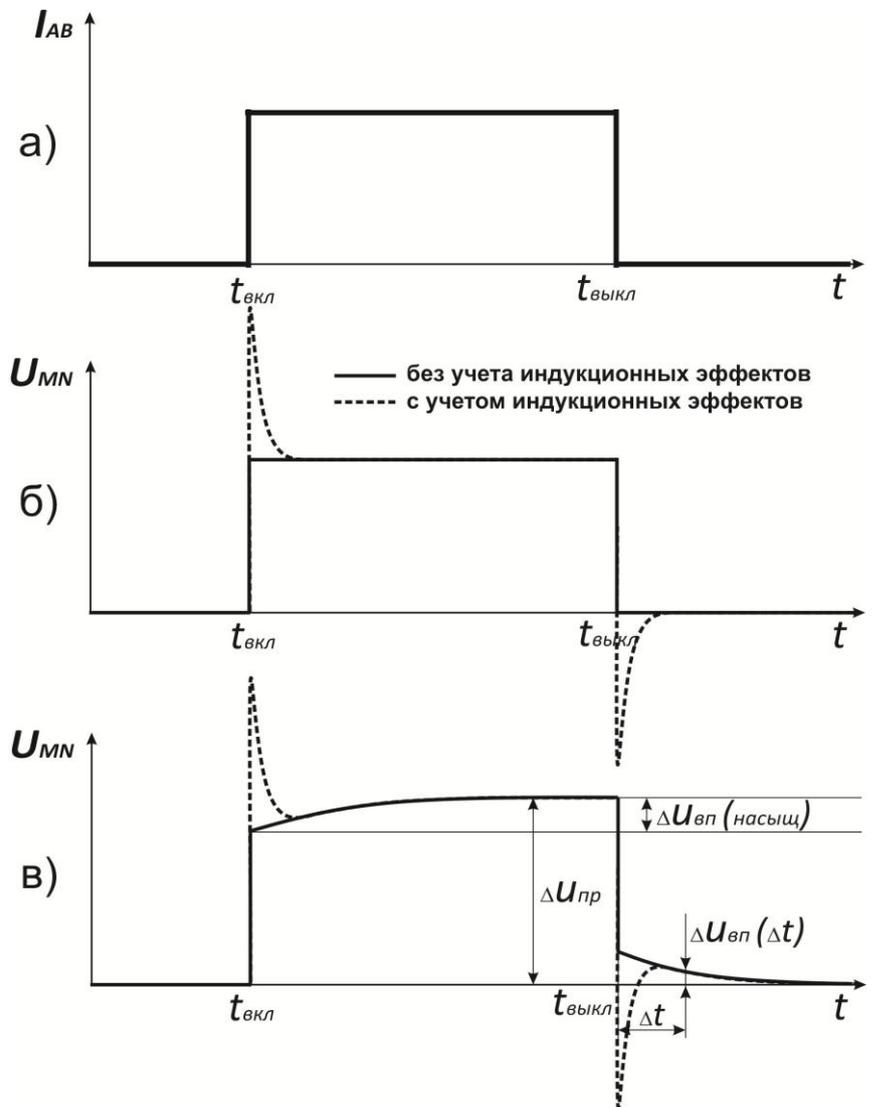


Рис. 2.

а) Форма тока в линии АВ

б) Сигнал в линии MN над неполяризующейся средой

в) Сигнал в линии MN над поляризующимся объектом

Среда, над которой находится установка AMNB, на практике неоднородна, поэтому результаты измерений дают не истинную, а **кажущуюся поляризуемость η_k** . Обычно измерение ВП объединяют с измерением кажущегося сопротивления $\rho_k = k \cdot \Delta U_{\text{пр}} / I_{\text{AB}}$, где k - геометрический коэффициент установки.

Амплитудно-частотные измерения.

По результатам измерений напряжённости поля на двух частотах можно рассчитать процентный частотный эффект:

$$PFE \stackrel{\text{def}}{=} \left(1 - \frac{\Delta U(\omega_2)}{\Delta U(\omega_1)}\right) \cdot 100\%$$

где ω_1 обычно выбирается в интервале от 0.5 до 2 Гц, а ω_2 - от 4 до 20 Гц. Параметр PFE пропорционален поляризуемости, поскольку в сигнале на низкой частоте явление ВП развито сильнее, чем на высокой частоте (рис.3).

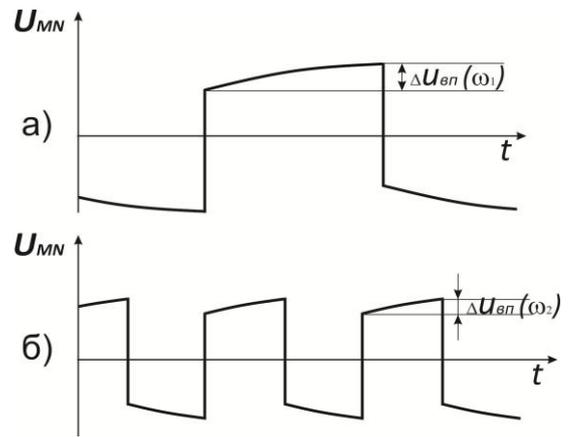


Рис. 3. К расчету PFE:
а) $\Delta U_{ВП}$ на низкой частоте
б) $\Delta U_{ВП}$ на высокой частоте

Фазово-частотные измерения.

В частотной области эффект ВП приводит к отрицательному сдвигу фазы $\varphi_{ВП}$ гармонического сигнала. Природу его возникновения можно понять из рис.4. Сверху изображен генерируемый в питающей линии меандр с периодом T и его основная гармоника, представляющая собой синусоиду, наилучшим образом приближающую исходный сигнал. Снизу изображен сигнал в приемной линии над поляризующимся объектом. Он имеет тот же период T , а значит, этот же период будет иметь и его основная гармоника. Однако, для того, чтобы приблизить искаженный эффектом ВП сигнал наилучшим образом, она будет смещена вправо на время $\Delta t_{ВП}$. Фаза ВП в этом случае будет равна $\varphi_{ВП} = \pi \Delta t_{ВП} / T$.

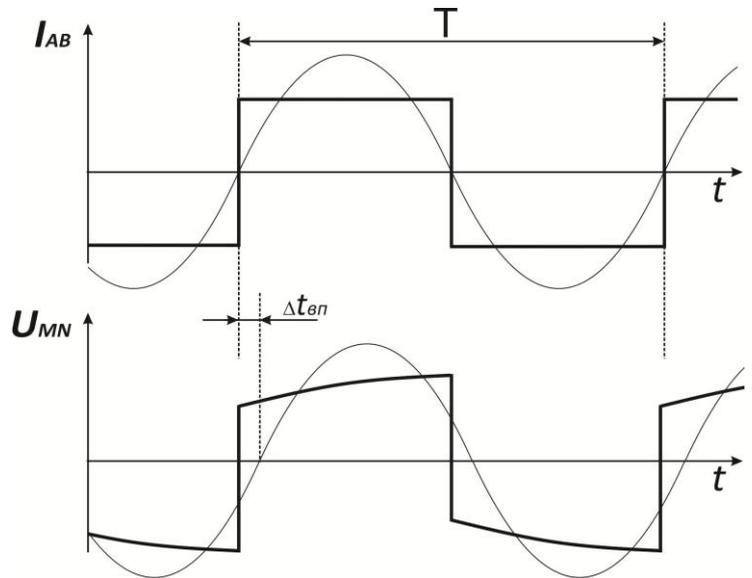


Рис. 4. Фаза ВП

Экспериментально выявлено, что для большинства пород фаза ВП линейно связана с кажущейся поляризуемостью:

$$\eta_k(\%) = -2.5\varphi_{ВП}(\text{°})$$

Очевидно, что индукционные эффекты (рис.2.) будут приводить к паразитным фазовым сдвигам $\varphi_{инд}$ гармонического сигнала. Существуют различные методы борьбы с этой помехой, но наибольшее распространение в отечественной электроразведке получило применение т.н. дифференциального фазового параметра (ДФП) $\Delta\varphi$. Он рассчитывается по результатам измерения на двух частотах по следующей формуле:

$$\Delta\varphi \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\varphi(\omega_1)\omega_2 - \varphi(\omega_2)\omega_1}{\omega_2 - \omega_1}$$

При определенных условиях $\Delta\varphi = \varphi_{ВП}$, при этом ДФП значительно подавляет индукционную составляющую фазы; также можно показать, что его значение не зависит от выбора точки отсчета фазы, т.е. он не требует синхронизации измерительного и генераторного устройства. Обычно ДФП применяется к 1 и 3 гармоникам сигнала в форме меандра.

Аппаратура



При проведении исследований в частотной модификации метода ВП с малыми разнесами можно применять портативную аппаратуру, например, генератор «АСТРА» и измеритель «МЭРИ-24» (производство ООО «Северо-Запад», г. Москва).

Генератор электроразведочный АСТРА-100 предназначен для создания в заземленной питающей линии прямоугольного сигнала вида “меандр” (рис. 5). Генератор способен работать в диапазоне частот, меняющихся от 0.019 до 312 Гц с геометрическим шагом, равным 2. Ток стабилизирован и может принимать значения от 1 до 1000 мА.

Как известно, любая периодическая функция $f(t)$ с периодом T может быть представлена в виде суммы синусов и косинусов (называемых гармониками ряда Фурье) от аргумента $n\omega t$, где n - целое положительное число, $\omega = 2\pi/T$ - угловая частота:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

При этом в разложении четных функций представлены только косинусы, а нечетных – только синусы. Таким образом приведенный на рисунке 5 меандр с амплитудой a может быть представлен в виде следующей суммы синусов:

$$f(t) = \frac{4a}{\pi} \left\{ \sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right\}$$

Как видно из последней формулы, в спектре токового сигнала существуют только нечетные гармоники (1-я, 3-я, 5-я и т.д.), амплитуда которых обратно пропорциональна её номеру.

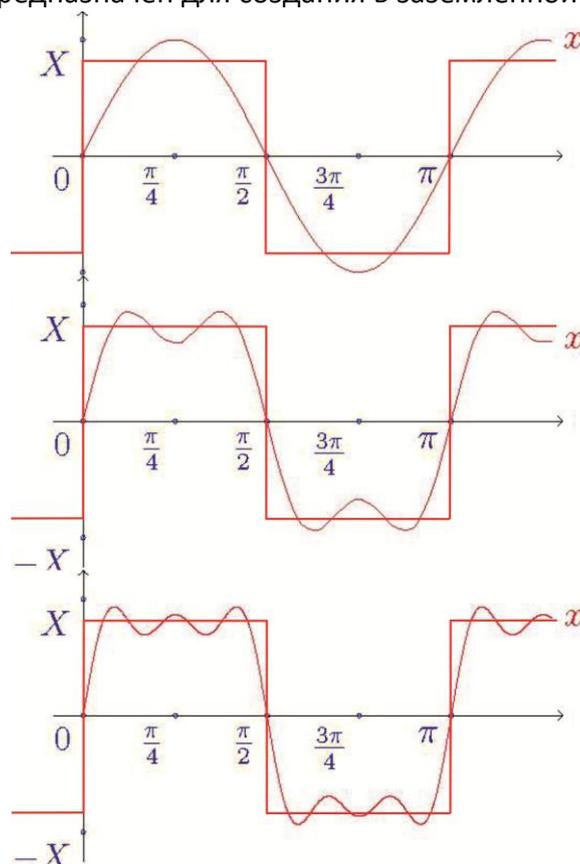


Рис.5. Прямоугольный сигнал (меандр) и его основные гармоники: 1-я (вверху), 1 и 3 (в центре), 1, 3 и 5 (внизу)

Измеритель электроразведочный низкочастотный МЭРИ-24 предназначен для регистрации амплитуд гармоник создаваемого генератором сигнала вида “меандр” и дифференциальных фазовых параметров, определяющих сдвиг между фазами первой, третьей и пятой гармоник. Входной сигнал после фильтрации, подавляющей высокочастотные и промышленные помехи, оцифровывается и далее обрабатывается встроенным процессором. В процессе обработки осуществляется статистическое подавление помех и расчет амплитуд гармоник и дифференциальных фазовых параметров через преобразование Фурье. Формула нахождения дифференциального фазового параметра по 1 и 3 гармонике (где $\omega_3 = 3\omega_1$) представляет собой частный случай формулы, приведенной выше, и выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi_{1-3} = \frac{\varphi(\omega_1)\omega_2 - \varphi(\omega_2)\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{3\varphi_1 - \varphi_3}{2}$$

Результаты обработки записываются в память прибора и выводятся на дисплей (при этом амплитуда каждой гармоники для удобства нормируется на её номер, то есть 3-я умножается на 3; 5-я на 5 и т.д.). Диапазон измеряемых сигналов - от 1 мкВ до 2 В. Подробная инструкция по работе с измерителем и генератором представлена на сайте <http://geophys.geol.msu.ru/>.

Необходимо отметить, что при проведении работ методом ВП приемная линия должна быть заземлена с помощью неполяризующихся электродов. Обычно используются керамические электроды, состоящие из сосуда с пластиковой крышкой, в которой закреплен медный стержень. Сосуд заполнен насыщенным раствором медного купороса, медленного фильтрующегося через пористые стенки в грунт. Наличие раствора медного купороса обеспечивает электрический контакт между электродом и грунтом и в то же время исключает окислительно-восстановительные реакции на поверхности металла. На практике также часто используются латунные приемные электроды.

Описание лабораторной работы

Задачей лабораторной работы является ознакомление с методом ВП, а также с аппаратурой АСТРА и МЭРИ. Необходимо определить положение погруженного в бак с водой металлического цилиндра, имитирующего рудное тело или техногенный объект (трубу), а также изучить характер возникающей над цилиндром аномалии. Для решения задачи требуется по профилю, пересекающему цилиндр, провести измерение амплитуд A_1 и A_3 первой и третьей гармоник сигнала в линии MN, а также дифференциального фазового параметра $\Delta\varphi_{1-3} = (3\varphi_1 - \varphi_3)/2$, определяющего фазовый сдвиг между этими гармониками. Затем нужно пересчитать измеренные параметры в кажущиеся сопротивления на первой и третьей гармониках ρ_k^1 и ρ_k^3 , процентно - частотный эффект PFE и кажущуюся поляризуемость η_k . В данной лабораторной работе используется установка срединного градиента. При этом применяются металлические питающие электроды и неполяризующиеся приемные электроды. Стенки приемных электродов представляют собой маленькие стеклянные колбы, заполненные медным купоросом, в который погружается медный стержень, а дно состоит из деревянных или агаровых пробок, через которые купорос медленно фильтруется во вмещающую среду.

Последовательность операций при выполнении работы:

1. Заранее подготовить таблицу для записи (удобно её сразу создать в Excel и заносить данные во время лабораторной работы в ноутбук)

Пикет	A_1	A_3	$\Delta\varphi_{1-3}$	ρ_k^1	ρ_k^3	PFE	η_k

2. Проверить соединения приборов: генератор к АВ, измеритель к MN.
3. Включить измеритель. Выбрать режим ВП. Установить на генераторе и измерителе рабочую частоту по усмотрению преподавателя (от 0.61 до 2.44 Гц).
4. Запустить генератор нажатием кнопки «START». Вплоть до окончания лабораторной работы генератор можно не останавливать.
5. Провести измерения на первой точке профиля. Для этого нажать кнопку «START» на панели МЭРИ-24. Убедиться в стабильности показаний (обычно достаточно 5-10 накоплений). Нажать «STOP». Занести в таблицу значения A_1 , A_3 и $\Delta\varphi_{1-3}$.
6. Провести аналогичным образом измерения на всех точках профиля.
7. Выключить питание генератора и измерителя, предварительно записав значение рабочей частоты f , Гц и силы тока в питающей линии I , мА.

Дальнейшая обработка полученных данных (выполняется дома):

1. Рассчитать значения ρ_k^1 , ρ_k^3 , PFE и η_k по формулам:

$$\rho_k^1 = k \frac{A_1}{I}; \quad \rho_k^3 = k \frac{A_3}{I}; \quad PFE = \left(1 - \frac{\rho_k^3}{\rho_k^1}\right) \cdot 100\%; \quad \eta_k = -2.5 \cdot \Delta\varphi_{1-3};$$

где k – геометрический коэффициент установки, равный 0.7 для всех точек наблюдения.

2. Построить графики рассчитанных параметров по профилю. На первом – ρ_k^1 и ρ_k^3 , в Ом·м (не забывайте про логарифмический масштаб оси ординат), на втором – PFE и η_k , в %.
3. Оценить глубину до центра цилиндра (рис.6).

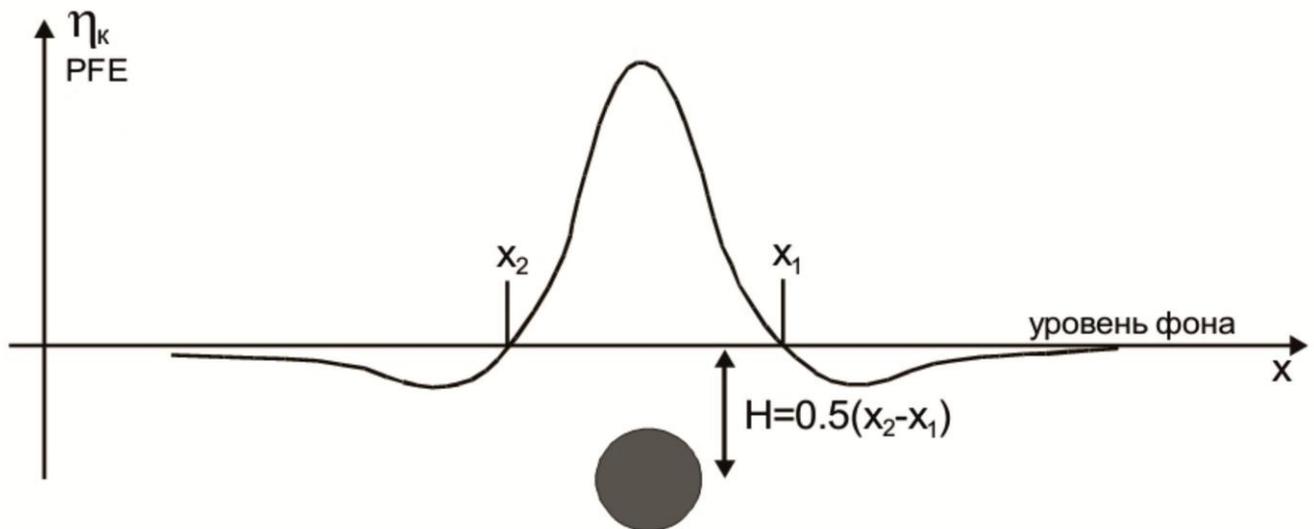


Рис. 6. Оценка глубины до поляризующегося цилиндра

В согласованный с преподавателем день требуется сдать задачу, т.е. объяснить полученные графики и ответить на поставленные вопросы. Кроме того, для допуска к выполнению задачи, непосредственно перед её выполнением необходимо пройти собеседование по данной разработке.

Вопросы к задаче

1. Природа вызванных потенциалов.
2. Примеры поляризующихся объектов.
3. Области применения метода ВП.
4. Импульсные измерения ВП.
5. Амплитудно-частотные измерения ВП.
6. Фазово-частотные измерения ВП.
7. Установки, используемые в методе ВП.
8. Борьба с помехами в методе ВП.
9. Генератор «АСТРА». Спектральный состав меандра.
10. Измеритель «МЭРИ-24».

Вопросы для размышления (после выполнения задачи):

1. Почему в разработке сказано использовать один и тот же геометрический коэффициент для всех точек измерения?
2. Почему по краям профиля получаются завышенные фоновые значения кажущегося сопротивления?
3. Почему для приемной линии берут неполяризующиеся электроды, а для питающей – обыкновенные стальные?

Литература

1. В.К. Хмелевской. Основы курс электроразведки. Ч.1. Изд. М. Университета, 1970.
2. М.С. Жданов. Электроразведка. М., «Недра», 1986.
3. В.А. Комаров. Э/р методом вызванной поляризации. Л., «Недра», 1980
4. А.В. Куликов, Е.А. Шемякин. Э/р фазовым методом вызванной поляризации. М., «Недра», 1978.
5. Электроразведка. Справочник геофизика. Книга вторая. М., «Недра», 1989.