

**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**УТВЕРЖДАЮ**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'А.С. Егоров'.

**Руководитель программы  
аспирантуры  
профессор А.С. Егоров**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ  
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫХ И  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ**

**Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре**

<b>Область науки:</b>	1. Естественные науки
<b>Группа научных специальностей:</b>	1.6. Науки о Земле и окружающей среде
<b>Научная специальность:</b>	1.6.9. Геофизика
<b>Отрасли науки:</b>	Геолого-минералогические Технические
<b>Форма освоения программы аспирантуры:</b>	Очная
<b>Срок освоения программы аспирантуры:</b>	3 года
<b>Составитель:</b>	к.г.-м.н., доц. И.Б. Мовчан

Санкт-Петербург

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

### Пересчет вниз данных точечного заряда

При измерениях геологической среды при помощи постоянного или гармонического стационарного тока, для упрощения геолого-геофизической модели, источники искусственного поля соотносят с системой точечных источников (например, в случае двух источников, имеется тот, с которого ток выходит в геологическую среду, и еще один, который принимает ток от среды). По этому принципу можно рассматривать различные, даже многоэлектродные системы относительно отдельных ТЗ, в то же время дополнительно основываясь на принципе суперпозиций электрических полей.

Также на практике используется допущение, при котором систему приводят к единственному отдельному источнику. Допускается это в случае расположения измерителя около одного источника, а другого – на значительном удалении от измерительной линии. Таким образом, происходит зондирование электрического поля исследуемой геологической среды при помощи точечного источника, во время перемещения измерителя по некоторому профилю. Данную установку принято называть установкой точечного заряда. При помощи нее, в случае горизонтально слоистой или вертикально слоистой среды, выполняется вертикальное или горизонтальное зондирование соответственно. На практике рекомендуется использовать метод точечного зондирования для конечного определения местоположения, проводящего или поляризующегося объекта, на основе проведенных ранее изысканий по местности методом срединного градиента ВП или методом ТЗ. Определение источника аномалии может производиться в одном или нескольких геоэлектрических разрезах.

Принцип установки ТЗ основывается на создании электрического поля при помощи точечного источника А как части градиент-установки. Для проведения изысканий выбирается 3 или более опорных профиля, и далее на них определяют 5-7 пикетов для источника А. Так как сила по центру аномалии ТЗ крайне минимальна, то может быть применимо даже одно заземление А в центре зоны проводимости или аномалии ВП. Другие точки заземлений А выставляют по разные стороны от экстремума аномалии. Так же необходимо, чтобы профили были не менее чем в 3-4 раза больше, чем теоретическая ширина и глубина аномального источника.

Что касается электрода В, с которого течет ток, то его принято размещать по прямой, перпендикулярно к выбранному профилю. Электрод В относят на теоретическую бесконечность, однако обязательно в разных с электродом А проводящих или поляризующихся зонах. В случае невыполнения данного условия, результаты будут искажены, а интерпретация – осложнена.

Принцип измерений основан на том, что электрод В не меняют в течении всего исследования, а данные по профилю от электрода А получают от одного к другому (А-1, А-2 и т. д.). В случае использования установки ТЗ совместно с методом заряда, может применяться одна питающая линия. Расположение приемных электродов выбирается так, чтобы они были размещены на равном расстоянии по разные стороны от электрода А. Возможная схема расположения питающих и приемных электродов для установки точечных зондирований ТЗ изображена на рис. 1.1.

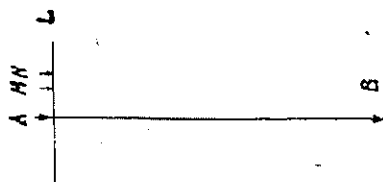


Рис.1.1 Возможный вариант схемы расположения питающих и приемных электродов для установки точечных зондирований

Положение электродов можно изменять, соблюдая все необходимые условия. Точечное зондирование отличается от других методов тем, что при выполнении перемещения приемной линии, меняется геометрический коэффициент установки  $K$ . Располагая электроды на местности и выбирая направление линии наблюдений токового электрода  $A$ , необходимо помнить, что для установки зондирования  $l_A$  должно быть значительно больше, чем  $l_B$ . Существует несколько способов выполнения этого условия: перпендикулярное расположение  $OB$  к  $MN$ , и определение расстояния между  $AO$  и  $BO$ . Имеются различные способы применения установок при детализации проводящего или поляризуемого объекта: профили метода ТЗ располагать вкрест или по простиранию аномалии, где кабель электрода  $B$  находится вкрест простиранию объекта, а длина профиля обеспечивает выход значений градиента потенциала поля источника тока на уровень нормального поля точечного источника тока.

При помощи установки ТЗ можно определить истинное расположение и качественно локализовать аномальный источник. Эта особенность является значимым преимуществом данной модификации. Что касается интерпретации, то результаты ТЗ помогают наглядно дополнять данные, основанные на методах ТЗ-ВП и ТЗ-РК, по контурам рудных тел и геоэлектрических разрезов в истинных масштабах глубины залегания.

Для решения обратной задачи, по данным на профилях изысканий, соотносят общие свойства у поляризуемости  $\eta_k$  и кажущегося сопротивления  $\rho_k$ , по их градиентам и интегральным характеристикам. В заключении, опираясь на результаты исследований при помощи установки ТЗ, выполняется оценка расположения центра поляризованного тела, направления его главной оси - падения, внешнего контура тела со стороны профиля наблюдений и глубина его верхней кромки, а также можно судить о размерах и форме тела, определить объем и текстуру электропроводящих минералов. К тому же, возможно говорить о свойстве поляризации тел, образующих аномалию при измерениях  $\rho_k$ .

Поле точечного источника постоянного тока

Теория электроразведочных методов постоянного тока основана на использовании стационарной модели электромагнитного поля. В этом случае электрическое поле  $\vec{E}$  является безвихревым и удовлетворяет уравнению Лапласа. В теории поля показано, что векторная функция, удовлетворяющая этому уравнению, может быть однозначно описана скалярной функцией, называемой потенциалом. Переход от векторной характеристики к скалярной упрощает решение многих задач.

Скалярный потенциал  $U$  связан с постоянным электрическим полем  $\vec{E}$  соотношением,

$$\vec{E} = \text{grad } U \quad (1.1)$$

которое в случае, если известно направление изменения потенциала, заданное ортом  $\vec{i}_r$ , которое может быть записано в более простом виде:

$$\vec{E} = -\frac{\partial U}{\partial r} \cdot \vec{i}_r \quad (1.2)$$

Данная задача является простейшей задачей электроразведки постоянным током в однородном пространстве. Пусть электрод  $A$  посылает в Землю ток силой  $I$ . Сопротивление воздуха бесконечно велико, поэтому весь ток растекается в Земле, имеющей сопротивление  $\rho$ . Земля однородна, следовательно, ток от источника течет равномерно по всем направлениям, т.е. линии плотности тока  $\vec{j}$  представляют собой прямые лучи, исходящие из точки  $A$ .



Рис. 1.2 Поле точечного источника постоянного тока, над однородным разрезом.

Следовательно, плотность тока в любой точке М, расположенной на полусфере, равна силе тока, деленной на площадь полусферы:

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi r^2} \vec{ir} \quad (1.3)$$

По закону Ома  $\vec{E} = \vec{j}\rho$ , получим:

$$-\frac{\partial U}{\partial r} \vec{ir} = \vec{j}\rho \quad (1.4)$$

Теперь перейдем к формуле:

$$\frac{\partial U}{\partial r} = -\frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1.5)$$

Проинтегрировав это уравнение в пределах от  $\infty$  до некоторого конкретного значения  $r$ , получим:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.6)$$

Итак, потенциал точечного источника пропорционален силе тока  $I$  и сопротивлению  $\rho$  и обратно пропорционален расстоянию до источника  $r$ . Очевидно, что напряженность электрического поля, как производная потенциала, будет убывать при удалении от точечного источника как  $1/r^2$ .

#### Геологическая применимость

Точечный источник постоянного тока, описанный выше, является идеализированной моделью реальных источников, используемых в электроразведке. Практически постоянный электрический ток в земле создают в электроразведке с помощью двух заземлений А и В, подключаемых к генератору или к батарее постоянного тока. Заземления представляют собой погруженные в землю металлические электроды чаще всего стержневой формы. При выводе формул, описывающих электрическое поле в земле, обычно пренебрегают формой электродов и рассматривают их как точечные. Такое допущение правомерно, поскольку уже на расстояниях порядка четырех-пяти длин электродов поле от них практически совпадает с полем точечных источников.

Если электрод В отнесен от электрода А на достаточно большое расстояние, в окрестности электрода А электрическое поле в земле совпадает с полем точечного источника, описанным выше. В общем же случае для изучения распространения постоянного электрического тока в земле необходимо рассмотреть задачу о поле двух разнополярных источников А и В, расположенных на поверхности проводящего полупространства с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . Теория электроразведки включает решение прямых и обратных задач.

Говоря об явлении электростатической индукции при помещении проводника во внешнее электрическое поле, то в данных условиях его нейтральный заряд разделяется на два: на **положительный и отрицательный**. Эти заряды, проходя макроскопические расстояния, сопоставимые с размером проводника распределяются по его поверхности так, что суммарное поле в объеме проводника стремится к нулю.

Способ решения обратной задачи

Графо-аналитический метод интерпретации

Исходя из заключения о закономерностях распределения графиков  $\eta_k$  и/или  $\rho_k$ , выведенного на основе расчетов, в процессе нахождения центра аномалеобразующего тела изометрической формы, получено: расстояние между центром сферического тела и электродом, с которого стекает ток, примерно равно интервалу между экстремумом (максимум) графика и источником тока.

Проводя окружности из точек электрода А, с радиусом равным расстоянию между А и местом максимума кажущейся поляризуемости (кажущегося удельного сопротивления), получаем пересечение дуг окружностей, которое характеризует местоположение центра аномалеобразующего тела.

В условиях автоматизированного выполнения интерпретации, накладывается специальная координатная сетка по данным разреза, узлы которой содержат определенные значения кажущейся поляризуемости (кажущегося удельного сопротивления). Значения в узлах равны измеренным по профилю, и характеризуются равным расстоянием от токового электрода, что и сам узел.

Для каждой из ветвей графиков точечного зондирования выносятся значения  $\eta_k$  ( $\rho_k$ ) на плоскостях разреза: по правой ветви – на правую часть разреза, по левой ветви – на левую часть. Граничат между собой полуплоскости по специальному лучу, с началом в стоянке токового электрода, и проходящему далее вертикально вниз. После этого, выполняется нахождение всех сумм в каждой узловой точке, для всех точек зондирования. Необходимо иметь как минимум две ТЗ, а для достижения большей точности – три. Принцип совершения операции графически отображен на рис. 1.3.

Далее производят вычисление средних значений  $\eta_k$  ( $\rho_k$ ), для учета различий в разных узлах различие числа суммируемых значений  $\eta_k$  ( $\rho_k$ ). После этого вычисляется максимальное среднее значение  $[\eta_k]_{\max}$  ( $[\rho_k]_{\max}$ ) для отдельной плоскости, и выполняют деление средних значений по каждому узлу на максимальное среднее значение.

Как итог интерпретации выводится относительная интенсивность вызванной поляризации - ОИ-ВП, а для случая ТЗ –РК получают относительную интенсивность кажущегося сопротивления - ОИ-РК. Потом эти значения отсортировывают с определенным шагом в выборках, и в результате назначается значение для каждой отдельной выборки.

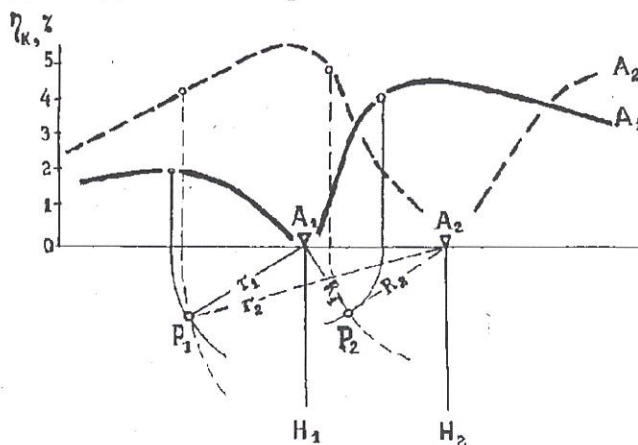


Рис.1.3 Графики  $\eta_k$  для двух положений точечного источника  $A_1$  и  $A_2$  и соответствующее им суммирование  $\eta_k$  в точках  $P_1$  и  $P_2$  плоскости разреза

Так как наиболее значимыми данными для этапа построения геоэлектрического разреза являются максимально отдаленные источники тока, которые располагаются вне проекции тела на профиль наблюдений, то необходимо использовать все ТЗ.

В результате получаем, что изолинии ОИ-ВП становятся подобны перпендикулярам и отображают проекцию на профиль центра поляризованного тела (эпицентр), в то время как глубина гипоцентра – постоянна. Чтобы определить глубину гипоцентра, необходимо обратить внимание на источники около эпицентра, и тем самым – учесть их влияние. Учет близрасположенных источников происходит на втором этапе интерпретации при помощи специальных весовых коэффициентов.

Возможный вариант для самостоятельного решения (определяется преподавателем)

1. Аспирантам предоставляются образцы полевых данных, накопленные в рамках экспедиционных работ по отдельным месторождениям и рудопроявлениям.
2. На основе полученных данных и вышеприведенной методики графо-аналитического метода, необходимо выполнить интерпретационные построения с соответствующими выводами.
3. По результатам необходимо оформить входные и итоговые данные в виде отчета.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие кажущегося удельного сопротивления от истинного удельного сопротивления горных пород?
2. Как инструментально определить кажущуюся поляризуемость?
3. Как поляризуемость рудных тел связана со степенью вкрапленности диспергированности руды во вмещающих толщах?
4. Как выглядит установка точечного зондирования?
5. В чем состоит метод засечек при решении обратной задачи?

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2**

### **Аналитическое продолжение поля вниз**

Геофизические аномалии прежде всего характеризуются полями, образующимися в результате суммарных эффектов некоторого множества геологических тел с разным распределением аномальных свойств, разной формы и разной глубиной залегания (а также, при наличии ряда геоструктурных этажей). В связи с этим, выделение отдельных единиц аномалий, исключая сторонние воздействия, часто становится невозможным. Поэтому уже некоторое время разрабатываются многочисленные способы «контрастирования» локальных или региональных аномалий, так называемые трансформации, посредством которых выполняются преобразования исходного аномального поля. Одними из наиболее активно применяемых способов преобразований полей, являются аналитические продолжения в нижнее или в верхнее полупространства, выделяющие отдельные составляющие поля. Пересчетом вверх называется продолжение поля на уровень, располагающийся выше поверхности наблюдений, с его помощью выполняется уменьшение влияния локальных аномалий (уменьшение амплитуд) при незначительном изменении региональных. В результате чего, относительно некоторой выбранной высоты пересчета, можно соотнести региональный фон с трансформированными значениями. Продолжение поля вниз, называется пересчет исходного поля ниже плоскости наблюдений; с его помощью выполняется выделение локальной составляющей аномалии. Далее в данной практической работе подробно рассмотрим именно этот способ.

При интерпретации данных геофизических съемок нередко используются вышеупомянутые способы, они являются основой для решения множества обратных задач и определения геологических особенностей изучаемой местности. Данные методы преобразования позволяют выделить основные структурные элементы изучаемого участка: геологические блоки, тектонические нарушения, дайки и т.д.

Продолжение поля вниз.

С целью выполнения продолжения потенциального поля рассмотрим двухмерную задачу. Пусть заданы значения поля на прямой  $z = z_1$ ; Тем самым, для продолжения поля вверх необходимо вычислить поле  $u''(x)$  на прямой  $z = z_2 > z_1$ . В данной практической работе рассматривается продолжение поля вниз, следовательно, по полю  $u''(x)$  нужно найти  $u'(x)$ . Применим интеграл Пуассона, в данном случае как интегральное уравнение, относительно дискретного поля:

$$\begin{aligned} u''(i) &= A \sum_j \frac{u'(j)}{(j-i)^2 + B^2}, \\ u''(i) &= u''(x_i); u'(j) = u'(x_j); \\ x(i) &= i\Delta x; x(j) = j\Delta x \\ B^2 &= \frac{H^2}{\Delta x^2}; A = \frac{H}{x\Delta x}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $H = z_2 - z_1$ . Перебирая индекс  $i$ , получается система уравнений:

$$\begin{bmatrix} K & K & K & K & K \\ K & \frac{1}{B^2} & \frac{1}{1+B^2} & \frac{1}{4+B^2} & K \\ K & \frac{1}{1+B^2} & \frac{1}{B^2} & \frac{1}{1+B^2} & K \\ K & \frac{1}{4+B^2} & \frac{1}{1+B^2} & \frac{1}{B^2} & K \\ K & K & K & K & K \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M \\ u'(-2) \\ u'(-1) \\ u'(0) \\ u'(1) \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ u''(-2) \\ u''(-1) \\ u''(0) \\ u''(1) \\ M \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Расчет данной системы уравнений можно вычислить при помощи специализированного программного обеспечения, но следует учитывать, что при выполнении обработки профилей значительных размеров время и объемы расчетов увеличатся. Для выполнения расчета в более экономичном режиме можно также использовать алгоритм Левинсона (в виде теплицовской структуры матрицы коэффициентов). В спектральной области решение будет выглядеть как:

$$U'(v) = \frac{U''(v)}{e^{-j2\pi H|v|}} \quad (2.3)$$

Продолжение поля вниз будет описываться спектральной характеристикой:

$$P^{-1}(v) = e^{2\pi H|v|}. \quad (2.4)$$

На основе полученных формульных выражений, продолжение поля в нижнее полупространство на глубину  $h$  соотносится с обратной фильтрацией поля для аномалий, вызванных возмущающимися массами на этой глубине. Расчет разреза выполняется при помощи последовательного вычисления поля для ряда глубин, где контрастируются зоны расположения возмущающих тел (рис 2.1).



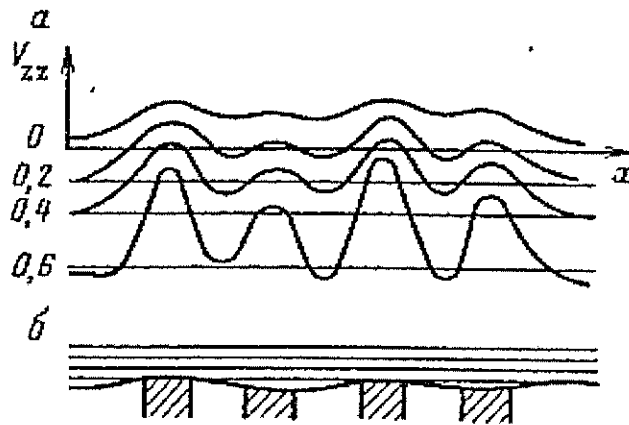


Рис. 2.1 Продолжение поля в нижнее полупространство при изучении фундамента (цифры слева - глубины пересчета поля, км)

Уточним все вышесказанное: расположение возмущающих объектов в пределах некоторой местности определяется на основе аномальных значений поля, отфильтрованных при помощи параметра полуширины. Фильтрация выполняется при помощи сглаживания полей во время поглубинного пересчета и дальнейшего продолжения в глубину по направлению к источникам.

Необходимо упомянуть, что принципиальным аспектом является учет влияния источников в интервале «земная поверхность – глубина  $H$ » (ослабление влияния или исключение влияния). Измеренные значения поля на поверхности земли (где  $z = 0$ ) преобразуются путем расчетов «вверх», где  $z = -H$  (решение задачи Дирихле для верхнего полупространства - интегральная формула Пуассона). Рассчитанное поле после сглаживания с высоты  $z = -H$  аналитически продолжается вниз на глубину  $z = +H$ , в результате чего убирается влияние приповерхностных локальных источников до глубины  $H$ .

При выполнении расчета поля вниз определяется решение обратной задачи при помощи инверсии интегрального оператора формулы Пуассона. В виду того, что подобная задача является некорректно поставленной, применяются методы регуляризации.

Получается, что пересчет вниз выполняется решением обратной задачи аналитического продолжения потенциальных полей, где повысотная фильтрация основана на разности последовательно рассчитанных полей в пределах определенного интервала глубин.

При пересчете поля вниз из формулы Пуассона определяется уравнения Фредгольма первого рода относительно глубины  $z = +H$  по ее значению на высоте  $\zeta = -H$ :

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2H}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + 4H^2]^{3/2}} \times u(x, y, H) dx dy = \bar{U}(x', y', -H) \quad (2.5)$$

Обозначим через  $K$  интегральный оператор этого уравнения:

$$Ku = \bar{U} \quad (2.6)$$

Исследуемая задача, как уже было сказано ранее, принадлежит классу некорректно поставленных, в связи с этим при решении используется регуляризация сдвигом (схема Лаврентьева):

$$(K + \alpha I)u = \bar{U} \quad (2.7)$$

где  $I$  – единичный оператор,  $\alpha$  – параметр регуляризации.

Разделение составляющих поля по глубине возможно при условии определенного выбора экстремальных значений параметра регуляризации. Преимущественно, на величину значений параметра регуляризации влияет морфология исходного сигнала и шаг дискретизации; и



получается, что решение обратной задачи зависит от выбора параметра регуляризации и порождает множество эквивалентных истолкований. Если значение параметра регуляризации  $\alpha$  чрезмерно большое, пересчет поля на глубину будет сильно «сглажен».

Таким образом, итогом применения аналитического продолжения вниз со сглаживающим фильтром (с дополнением данных априорной информацией) выступает модель разделенных полей некоторой точности, отображающая положение аномальных источников на разных глубинах.

Алгоритм выполнения задания

1. На основе приведенных выше выражений по выданным преподавателем вариантным сигналам выполнить расчет поля в нижнее полупространство.
2. Для начала при помощи компьютерных средств произвести сглаживание сигнала в окне фиксированной ширины, при условии, что ширина окна пропорциональна глубине. Для определения остаточной компоненты сигнала необходимо из исходного сигнала вычесть его сглаженную компоненту. В результате, остаточная компонента сигнала будет соотносится с глубиной.
3. Следующим шагом выполняется вычитание из сигнала остаточной компоненты и окно увеличивается на постоянную величину (равна шагу оцифровки сигнала).
4. После этого начинается новый цикл: выполняется новое сглаживание, новый расчёт остаточной компоненты и новое отнесение этой остаточной компоненты к новой, большей глубине, пропорциональной ширине окна.
5. Подобные циклы необходимо повторять до тех пор, пока скользящее окно не станет равным  $1/3$  от длины профиля.
6. Конечным шагом нужно произвести формирование матрицы  $x, z, T$ , где  $x$  - координата по линии профиля,  $z$  - глубина пересчёта,  $T$  - значения остаточных компонент геофизического поля, и на основе нее отстраивается схема изолиний (параметрический разрез).

Контрольные вопросы

1. Какие есть способы выполнить решение обратных задач электроразведки?
2. Для чего применяется аналитическое продолжение поля в нижнее полупространство?
3. Какие геоструктурные объекты можно выделить при выполнении пересчета поля в нижнее полупространство?
4. В чем отличие продолжения поля вниз от пересчета поля вверх? Назовите физический смысл данных преобразований.
5. Что такое «особые точки аналитического продолжения»?

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3 Фильтрация картографических материалов

Пусть  $f(x)$  – изучаемое поле, содержащее два случайных некоррелированных между собой слагаемых – полезный сигнал  $A(x)$  и помеху  $a(x)$ :

$$f(x) = A(x) + a(x) \quad (3.1)$$

Рассматриваемый оптимальный фильтр обеспечивает линейное преобразование исходной функции  $f(x)$ , результатом которого является функция  $\hat{A}(x)$ , наименее отклоняющаяся от полезного сигнала:

$$M \varepsilon_{\varphi}^2 = M [A(x) - \hat{A}(x)]^2 = \min \quad (3.2)$$

где  $M$  – математическое ожидание,  $\varepsilon_{\varphi}^2$  – среднее квадратическое отклонение (СКО). СКО  $\varepsilon_{\varphi}^2 = B(0)$ , поэтому:

$$M \varepsilon_{\varphi}^2 = B(0) = \int_0^{\infty} G_{\varepsilon}(\omega) d\omega, \quad (3.3)$$

Где  $G_e(\omega)$  – энергетический спектр результата трансформации.

Обозначим:  $H(\omega)$  – частотная характеристика линейного преобразования,  $G_A(\omega)$  и  $G_a(\omega)$  – энергетические спектры полезного сигнала и помехи соответственно. Таким образом имеем:

$$G_e(\omega) = G_A(\omega)[1 - H(\omega)]^2 + G_a(\omega)H^2(\omega) \quad (3.4)$$

К правой части выражения (3.4) прибавим следующее слагаемое:

$$\frac{G_A^2(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} - \frac{G_A^2(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} \quad (3.5)$$

После элементарных преобразований получим:

$$G_e(\omega) = \left[ H(\omega)\sqrt{G_A(\omega) + G_a(\omega)} - \frac{G_a(\omega)}{\sqrt{G_A(\omega) + G_a(\omega)}} \right]^2 + \frac{G_A(\omega)G_a(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} \quad (3.6)$$

Минимум полученной функции достигается при условии равенства нулю слагаемого в квадратных скобках. Таким образом, частотная характеристика оптимального фильтра  $H_{opt}(\omega)$  равна:

$$H_{opt}(\omega) = \frac{G_a(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} \quad (3.7)$$

При оптимальном фильтре получим выражение для энергетического спектра результата трансформации  $G_e(\omega)$ :

$$G_e(\omega) = \frac{G_A(\omega)G_a(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} \quad (3.8)$$

Учитывая данные условия выражение (3.3) переписывается в виде:

$$M\varepsilon_\varphi^2 = \int_0^\infty \frac{G_A(\omega)G_a(\omega)}{G_A(\omega) + G_a(\omega)} d\omega \quad (3.9)$$

Весовая функция оптимального фильтра  $h_{opt}(x)$  может быть выражена через спектральную характеристику фильтра (3.7):

$$h_{opt}(x) = 2 \int_0^\infty H_{opt}(\omega) \cos(\omega)x d\omega \quad (3.10)$$

Результатом трансформации функции  $f(x)$ , используя оптимальный фильтр, является интеграл свертки:

$$\hat{A}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty h(x-\xi)f(\xi)d\xi, \quad (3.11)$$

где  $\xi(x)$  - одномерная случайная функция

Полученный результат можно заменить на сумму:

$$\hat{A}(x) = \sum_{n=-N}^N C_n f(x - n\Delta x), \quad (3.12)$$

где  $n$  - номер отсчета,  $\Delta x$  - шаг дискретизации по горизонтальной оси,  $C_n$  - коэффициенты весовой функции:

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty H(\omega) \cos(\omega)n\Delta x d\omega \quad (3.13)$$

Зная радиусы автокорреляции  $r_A$  и  $r_a$ , средние значения амплитуд  $\bar{A}^2$  и  $\bar{a}^2$  полезного сигнала и помехи соответственно и аналитическое представление нормированной функции автокорреляции (ФАК)  $B_n(\tau) = e^{-\frac{\tau^2}{r^2}}$ , становится возможным нахождение значения энергетических спектров  $G_A(\omega)$  и  $G_a(\omega)$ , а после – перейти от частотной характеристики оптимального фильтра

$H_{opt}(\omega)$  к коэффициентам весовой функции  $C_n$ . Имея в виду, что  $B_n(\tau) = \frac{B(\tau)}{B(0)}$ , а  $B(0)$  равно среднеквадратичной амплитуде процесса, имеем:

$$G_A(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}^2 B_n(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau = \bar{A}^2 r_A \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega^2 r_A^2}{4}} \quad (3.14)$$

$$G_a(\omega) = \bar{a}^2 r_a \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{\omega^2 r_a^2}{4}} \quad (3.15)$$

Отсюда получаем связь частотной характеристики оптимального фильтра с энергетическими спектрами полезного сигнала и помехи:

$$H_{opt}(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{G_a(\omega)}{G_A(\omega)}} \quad (3.16)$$

Основные трудности при создании оптимального фильтра заключаются в определении исходных параметров  $\bar{A}^2, \bar{a}^2, r_A$  и  $r_a$ . Абсолютно точная их оценка на основании анализа суммарных значений исходного поля  $f(x)$  невозможно, так же как и невозможна оценка параметров случайной помехи. Объясняется это тем, в нее входят не только прямые погрешности измерений, но и геолого-геофизическая составляющая. Поэтому ошибка определения  $B(\tau)$  при малых  $\tau$  может быть очень большой.

Используя оптимальный фильтр в рамках теоретического исследования с целью выделения неявных аномалий на фоне помех и подставив в формулу (3.15)  $\bar{A}^2 = \bar{a}^2$  и  $r_A = 5r_a$ , И.Г. Клушин получил следующую формулу:

$$H_{opt}(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{5} e^{6\omega^2}} \quad (3.17)$$

Используя формулу (3.13) были определены коэффициенты  $C_n$ :  $C_0 = 0.148, C_1 = 0.136, C_2 = 0.107, C_3 = 0.069, C_4 = 0.033$ . Результаты разделения исходного сигнала на полезный и помеху представлен на рисунке 3.1.

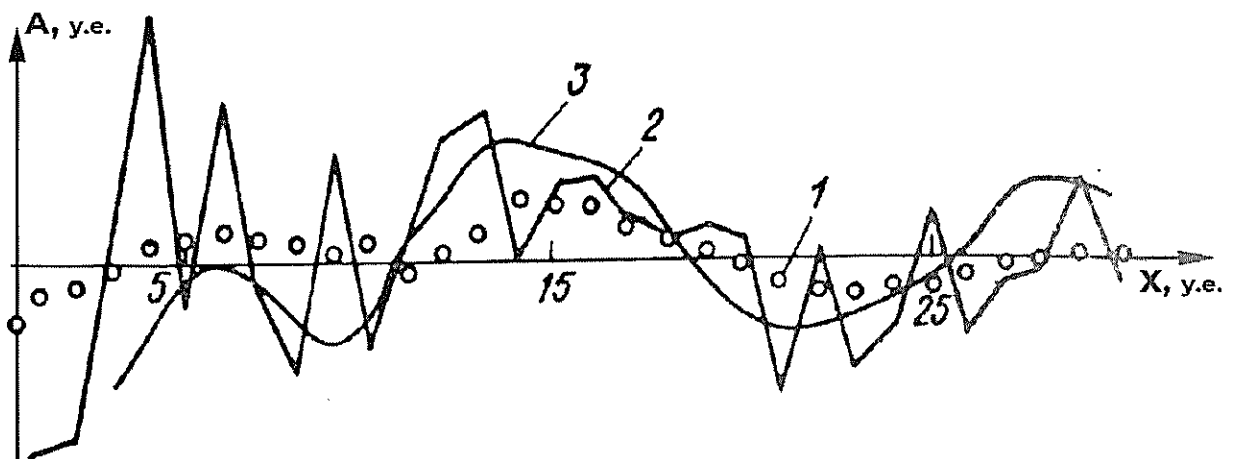


Рисунок 3.1. Выделение аномалий на уровне помех, где: 1 – исходный сигнал, 2 – сигнал, осложненный помехами, 3 – очищенный от помех сигнал

Возможный вариант для самостоятельного решения:

1. Аспирантам предоставляются образцы исходного сигнала: он может быть как результатом полевых геолого-геофизических изысканий, так и произвольно заданный преподавателем.
2. На основе полученных данных и вышеприведенной методики использования оптимального фильтра расчетно-графическим методом, необходимо:
  - 2.1. Согласно заданному преподавателем шагу дискретизации снять отсчеты исходной функции;
  - 2.2. Вычислить оптимальный фильтр, предварительно рассчитав энергетические спектры полезного сигнала и помехи.
  - 2.3. Вычислить коэффициенты весовой функции;
  - 2.4. Выполнить трансформацию исходной функции и получить очищенный от помех сигнал.
  - 2.5. Вычислить энергетический спектр результата.
  - 2.6. Выполнить оценку невязки исходного и полученного сигнала, обосновать ее наличие.
3. По результатам работы необходимо оформить исходные и полученные данные с логическими, обоснованными выводами в виде отчета.

Контрольные вопросы

1. Что такое оптимальный фильтр?
2. Чем определяются операции сглаживания?
3. На чем основан способ самонастраивающейся фильтрации?
4. Что выполняется при помощи способа самонастраивающейся фильтрации?
5. Что позволяет выполнять применение энергетического фильтра в условиях двумерной задачи?

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4 Обработка данных метода ВП

Теоретические сведения

Метод ВП в современной, как и в классической электроразведке, является одним из наиболее применяемых методов измерений. Четырехэлектродные установки, например АМNB (рис. 4.1), используются для проведения измерений ВП, а также в методе сопротивлений.

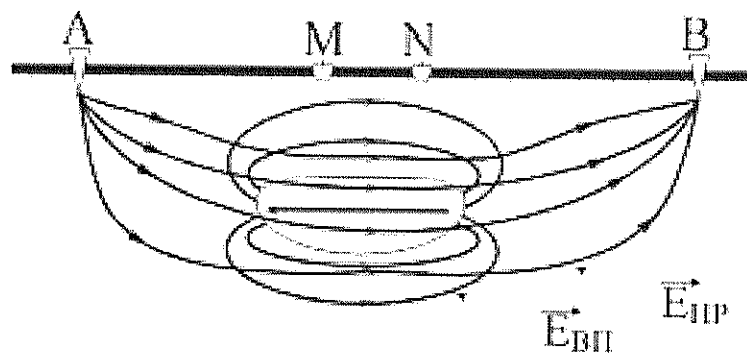


Рис.4.1 Элементарная схема измерений

Зачастую, когда выполняют профилирование методом ВП, используют установку срединного градиента СГ. Она в значительной степени уменьшает трудозатраты, так как позволяет с одного положения питающих электродов проводить наблюдение по одному или нескольким профилям, которые находятся в средней трети линии АВ. Чтобы повысить производительность работ, применяется многоканальная измерительная аппаратура. Она позволяет регистрировать сигнал сразу на нескольких линиях MN.

Величина первичного поля в два раза больше поля ВП, что является особенностью метода вызванной поляризации в сравнении с методом сопротивлений. Для того, чтобы повысить соотношение сигнал-помеха в ВП необходимо:

1. Пустить ток в линию АВ, сила которого будет больше чем в методе сопротивлений.
2. Использовать установки, в которых линии MN будут достаточно большими.
3. Использовать неполяризующиеся электроды в измерительной линии.

Методики, использующиеся в измерении ВП: импульсная, амплитудно-частотная и фазовая.

#### Импульсные измерения

Электрический ток пропускают через питающие электроды АВ в течение некоторого промежутка времени (рис. 4.2а). При условии, что измерения проводятся над неполяризующейся средой, то форма сигналов в приемной линии MN и питающей линии будут практически одинаковой. Небольшие отклонения будут связаны лишь с осложнениями в местах включения и отключения индукционными искажениями от вторичных токов в среде (рис. 4.2б).

Картина усложняется, если же в разрезе присутствуют поляризующиеся объекты (рис. 4.2в). После того, как происходит включение тока, среда начинает заряжаться, а поле ВП нарастать. Далее происходит выход на насыщение процесса поляризации, разность потенциалов становится постоянной в линии MN. После того, как ток выключают, поле ВП спадает аналогично тому же временному закону, по которому оно нарастало при включении тока. Индукционные эффекты накладываются в моменты скачкообразного изменения тока (результатирующие кривые изображены на рисунке штриховкой).

Для измерения поля вызванной поляризации выбирается одна или несколько временных задержек  $\Delta t$  после выключения тока в линии АВ. Регистрацию явления ВП можно провести и во время пропускания тока, но этот способ намного менее точен, так как поле ВП в несколько раз меньше первичного, на фоне которого и происходит наблюдение. Поляризуемость  $\eta$  служит мерой интенсивности процесса ВП. Она находится как отношение напряженности поля вызванной поляризации к напряженности поля во время пропускания тока:

$$\eta = \frac{\Delta U_{ВП}(\Delta t)}{\Delta U_{пр}} * 100\% \quad (4.1)$$

Очевидна зависимость поляризуемости от времени  $\Delta t$  задержки момента измерения поля ВП с момента выключения тока, кроме того, от времени пропускания тока в том случае, если процесс ВП не вышел на насыщение. Время зарядки и разрядки ионопроводящих горных пород составляет первые секунды. Наличие электропроводящих включений может увеличить это время до нескольких минут и даже больше. При выборе времени пропускания тока ориентируются на условие полной зарядки среды, однако его величина не должна быть слишком большой, чтобы не снижать производительность работ (обычно это диапазон от 10 секунд до одной минуты). Величина задержки  $\Delta t$  в свою очередь должна быть достаточно большой, чтобы была возможность пренебрегать индукционными искажениями, но в то же время и достаточно маленькой, чтобы негативно не отразиться на эффекте ВП (рисунки 4в). Обычно  $\Delta t$  принято брать равным 0.5 с.

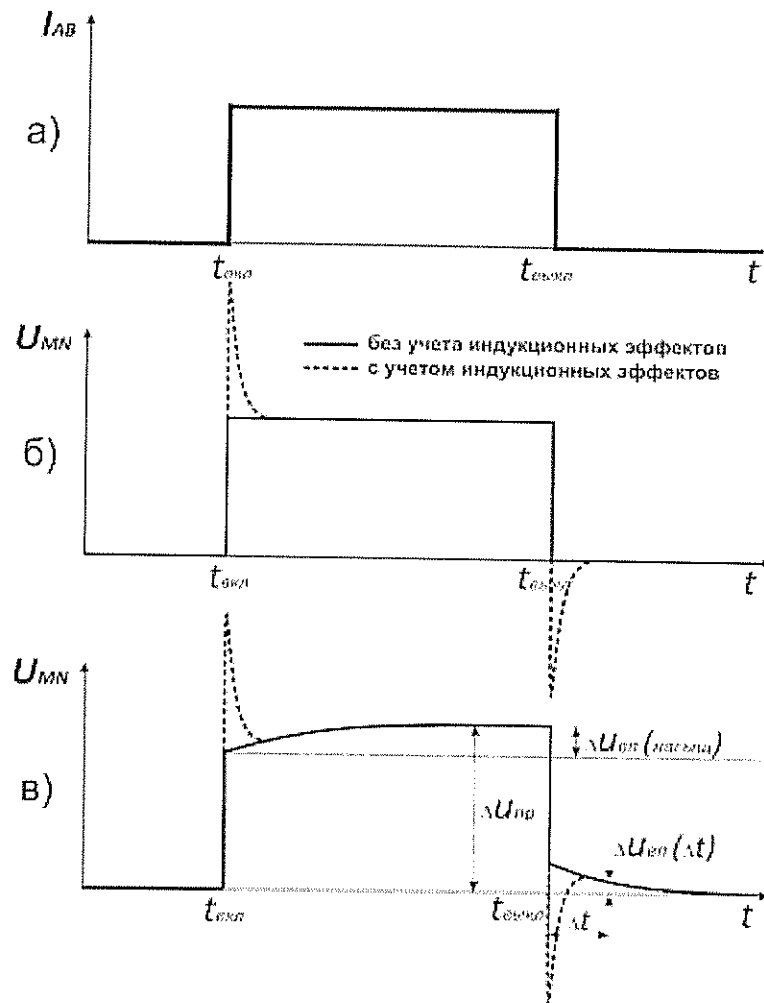


Рис 4.2 а) Форма тока в линии АВ; б) Сигнал в линии MN над неполяризующейся средой; в) Сигнал в линии MN над поляризующимся объектом

На практике же АМNB устанавливают над неоднородной средой, а соответственно, результатом таких измерений является не истинная, а кажущаяся поляризуемость  $\eta_k$ . Зачастую измерение ВП объединяют с измерением кажущегося сопротивления  $p_k = k \cdot \Delta U_{пр} / I_{AB}$ , где  $k$  - геометрический коэффициент установки.

Амплитудно-частотные измерения.

Процентный частотный эффект может быть получен на основе результатов измерения напряженности поля на двух разных частотах:

$$PFE \stackrel{def}{=} \left( 1 - \frac{\Delta U(\omega_2)}{\Delta U(\omega_1)} \right) \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Где  $\omega_1$  берется из интервала от 0.5 до 2 Гц,  $\omega_2$  - от 4 до 20 Гц. Из-за того, что явление ВП на низкой частоте развито сильнее, чем на высокой, параметр PFE пропорционален поляризуемости (рис. 4.3).

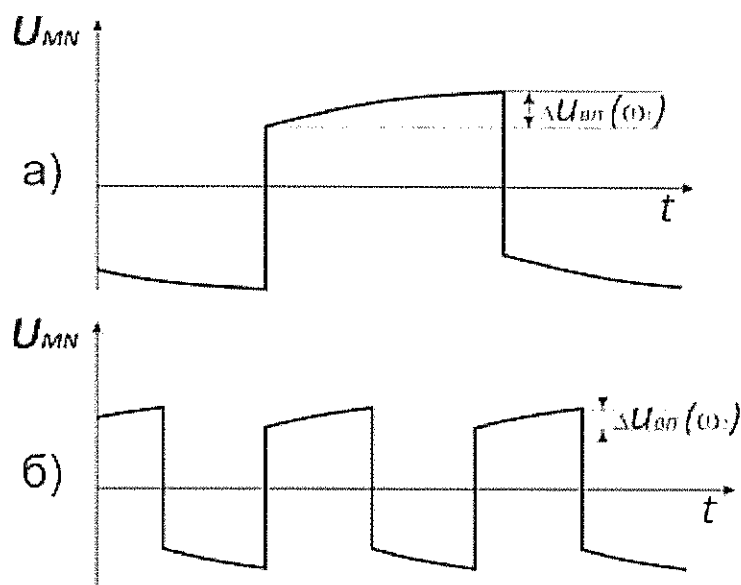


Рис. 4.3 К расчету PFE: а)  $\Delta U_{вп}$  на низкой частоте; б)  $\Delta U_{вп}$  на высокой частоте  
Фазово-частотные измерения

Эффект ВП является причиной отрицательного сдвига фазы в частотной области гармонического сигнала. На рис. 4.4 сверху изображен меандр, который генерируется в питающей линии, а также его основная гармоника (синусоида, наиболее точно приближенная к исходному сигналу). Период его равен  $T$ . Снизу же представлен сигнал в приемной линии над поляризуемым объектом. Его период так же равен  $T$ , соответственно его основная гармоника так же будет иметь этот период. На деле же, чтобы наиболее точно приблизить сигнал, который искажен эффектом ВП, она будет смещена вправо на время  $\Delta t_{вп}$ . В этом случае фаза ВП равняется  $\varphi_{вп} = \pi \Delta t_{вп} / T$ .

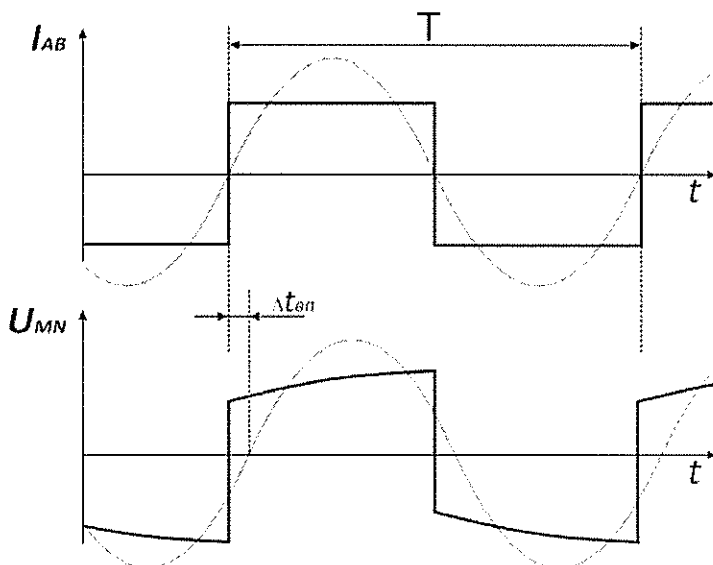


Рис. 4.4 Фаза ВП.

С помощью экспериментов было установлено, что фаза ВП для большинства пород имеет линейную связь с кажущейся поляризуемостью:

$$\eta_k (\%) = -2.5 \varphi_{вп} (^\circ) \quad (4.3)$$

Очевидным является то, что индукционные эффекты будут приводить к паразитным фазовым сдвигам  $\varphi$  гармонического сигнала. Чтобы с этим бороться, существуют несколько методов, но в отечественной электроразведке наибольшее распространение получило применение т.н. дифференциального фазового параметра (ДФП)  $\Delta\varphi$ . Его получают из результатов измерений на двух частотах, а его формула:



$$\Delta\varphi = \frac{\overset{def}{\varphi(\omega_1)\omega_2 - \varphi(\omega_2)\omega_1}}{\omega_2 - \omega_1} \quad (4.4)$$

В некоторых случаях  $\Delta\varphi = \varphi_{ВП}$ , при этом индукционная составляющая фазы в значительной степени подавляется ДФП; кроме этого, возможно показать, что выбор точки отсчета фазы не оказывает никакого влияния на его значение, другими словами, синхронизация измерительного и генераторного устройств не требуется. Зачастую ДФП применяется к 1 и 3 гармоникам сигнала в форме меандра.

#### Обработка данных ВП

Градуировочные графики строятся по данным градуировок для каждой чувствительности аппаратуры, которая была использована во время полевых измерений. Эти графики необходимы для того, чтобы перевести отсчет в миллиметрах в отсчет в милливольтгах (рис.4.5). Построение графиков необходимо выполнять на миллиметровой бумаге. По вертикали нужно отложить градуировочный импульс в миллиметрах, а по горизонтали - в милливольтгах.

Используя марки времени, необходимо определить точку, которая будет соответствовать 0.5 с, которые истекли после отключения поляризирующего тока. Через эту точку необходимо провести поперечную линию, которая на пересечение с кривой спада напряжения ВП образует отсчет  $\Delta U_{ВП}$  (линия 5-5 на рис. 4.5). Трасса канала  $\Delta U_{пр}$  на осциллограмме определяет момент выключения поляризирующего тока (линия 4-4 на рис. 4.5).

Амплитуды  $\Delta U_{ВП}$  и  $\Delta U_{пр}$  снимают с использованием измерителя, а затем при помощи градуировочных графиков переводят в милливольты и заносят в журнал. Отрезок а определяет величину  $\Delta U_{пр}$ , а отрезок б -  $\Delta U_{ВП}$ . Помимо этого, данные значения наносят на осциллограмму рядом с каждым кадром. Когда сильные помехи мешают определить достоверное положение нулевой линии канала  $\Delta U_{ВП}$ , в таком случае с осциллограммы снимается отрезок с, а также величина  $\Delta U_{ВП}$  находится по разностному отрезку.

Следует иметь в виду, что разность потенциалов  $\Delta U_{ВП}$ , которая соответствует 0.5 с, прошедшим после отключения поляризирующего тока, можно определить по измеренной разности потенциалов, которая соответствует двум моментам спада кривой ( $t_1$  и  $t_2$ ).

Используют зависимость:

$$\Delta U_{ВП}(0.5с) = \frac{\Delta U_{ВП}(t_1) - \Delta U_{ВП}(t_2)}{\tau(t_1) - \tau(t_2)} \quad (4.5)$$

где  $\tau(t_1)$  и  $\tau(t_2)$  – поправочные коэффициенты для времен  $t_1$  и  $t_2$ , при которых и замерены  $\Delta U_{ВП}(t_1)$  и  $\Delta U_{ВП}(t_2)$ .

Эти коэффициенты пропорционально зависят от времени зарядки и приводятся в соответствующей литературе. Примерные значения коэффициентов для условий Воронежского кристаллического массива приведены в таблице.

Следует иметь в виду, что значение  $\tau(t)$  в табл. 4.1 приведены для длительности зарядки 3 мин. По найденным таким образом значениям  $\Delta U_{ВП}$  и  $\Delta U_{пр}$  вычисляют  $\eta_k$  и  $\rho_k$ :

$$\eta = \frac{\Delta U_{ВП}(\Delta t)}{\Delta U_{пр}} * 100\% \quad (4.6)$$

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{пр}}{I}$$

где  $K$  – коэффициент установки (вычисляется по тем же формулам, что и в методе сопротивлений), м;  $I$  – сила тока в линии АВ, обычно в методе ВП измеряется в амперах, а так как  $\Delta U_{пр}$  и  $\Delta U_{ВП}$  измеряется в милливольтгах, то необходимо в коэффициент установки вводить множитель  $10^{-3}$ .

Таблица 4.1- Значения поправочных коэффициентов

Т, с	Значения поправочных коэффициентов $\tau$			
	0.5	1.0	2.0	5.0
$\tau(t)$ для приэлектродных	1,00	0,93	0,79	0,61

зон, расположенных на расстоянии $\leq 500$ м от питающих заземлений				
$\tau(t)$ для приэлектродных зон, находящихся на расстоянии $> 500$ м от питающих заземлений	1,00	0,84	0,69	0,50

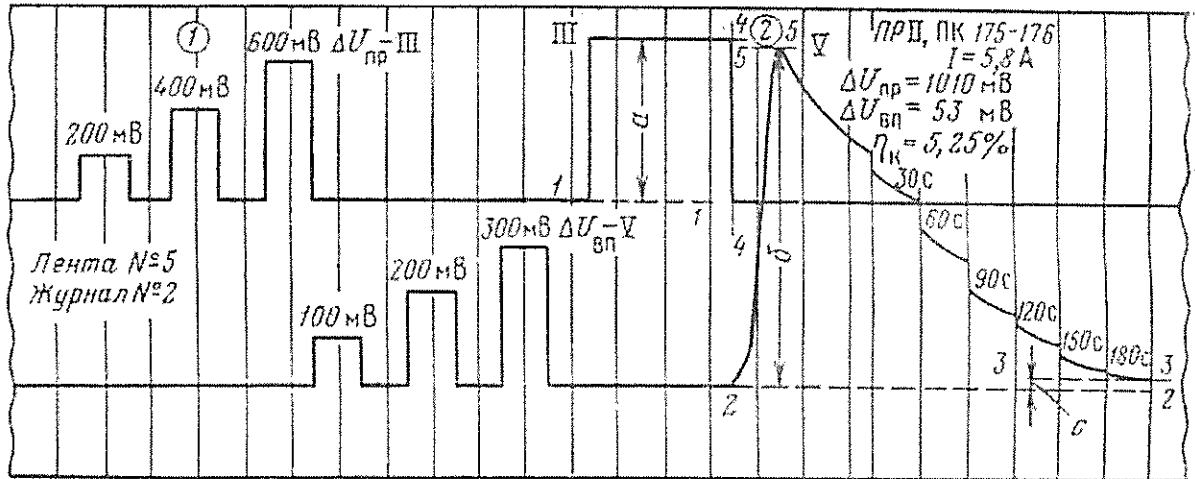


Рис.4.5 Пример обработки осциллограммы в методе ВП: а – амплитуда  $\Delta U_{пр}$ ; б – амплитуда  $\Delta U_{вп}$ , III – V – чувствительность измерительных каналов, цифры в кружках – номера кадров; (1-1) – (5-5) – отсчеты линии.

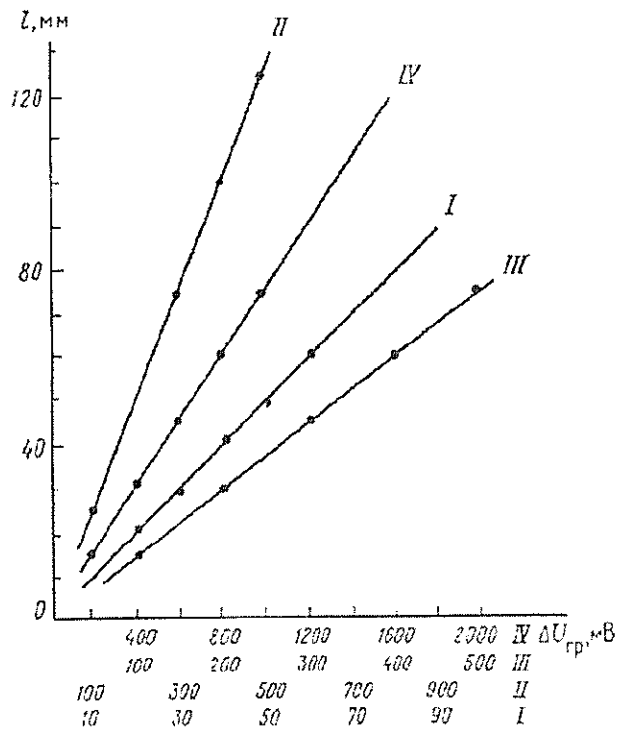


Рис.4.6 Пример построения градуировочных графиков в методе ВП: I – IV – чувствительность измерительных каналов.

Алгоритм выполнения задания

1. По данным, приведенным в таблице 2, построить градуировочные графики для каналов  $\Delta U_{пр}$  и  $\Delta U_{вп}$ . Масштаб вертикальный 1:1, горизонтальный для каждой чувствительности подобрать свой.
2. Используя градуировочные графики, построенные в задании 1, обработать осциллограмму ВП и вычислить  $\eta_k$  и  $\rho_k$ .

Таблица 4.2 - Данные градуировки станции

Канал $\Delta U_{гр}$								Канал $\Delta U_{вн}$							
Положение переключателя пределов															
300		100		30		10		300		100		30		10	
$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм	$\Delta U_{гр}$ мВ	L мм
200	15	100	15	100	25	10	10	50	25	20	20	5	10	2	5
400	31	200	29	200	50	20	21	100	50	30	31	10	19	4	11
600	44	300	46	300	75	30	29	150	75	40	41	15	31	6	14
800	61	400	60	400	100	40	41	200	100	50	49	20	40	8	20
1000	74	500	75	500	125	50	49	250	125	60	59	25	51	10	26

Контрольные вопросы

1. Что такое кажущаяся поляризуемость?
2. На чем основан метод ВП?
3. Опишите общую методику выполнения обработки данных съемки методом ВП?
4. Как выполняется интерпретация итоговых данных по методу ВП?
5. Назовите области применения метода ВП?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### 1. Основная литература

1. Мовчан И.Б., Яковлева А.А., Исакова Е.П. Электромагнитные методы [Электронный ресурс]: учеб. Пособие / СПб.: Горн.ун-т, 2018. – 76 с. – Режим доступа: -

[http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set\\_static\\_req&bns\\_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req\\_irb=<.>I=26%2E2%D1%8F73%2F%D0%9C%2074%2D310475927<.>](http://irbis.spmi.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=374&task=set_static_req&bns_string=NWPIB,ELC,ZAPIS&req_irb=<.>I=26%2E2%D1%8F73%2F%D0%9C%2074%2D310475927<.>) – Загл. с экрана.

2. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе : монография / В. И. Иголкин, Г. Я. Шайдуров, О. А. Тронин, М. Ф. Хохлов ; под редакцией Г. Я. Шайдурова. — Красноярск : СФУ, 2016. — 272 с. — ISBN 978-5-7638-3554-0. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/128735> (дата обращения: 24.01.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### 2. Дополнительная литература

1. Митрофанов, Г. М. Обработка и интерпретация геофизических данных : учебное пособие / Г. М. Митрофанов. - 2-е изд. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. - 168 с. - ISBN 978-5-7782-3805-3. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1867825> (дата обращения: 16.01.2023). – Режим доступа: по подписке.
2. Захарченко, Л. И. Геофизические методы контроля разработки МПИ : учебное пособие / Л. И. Захарченко, В. В. Захарченко. — Ставрополь: СКФУ, 2017. — 249 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/155104> (дата обращения: 24.01.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей