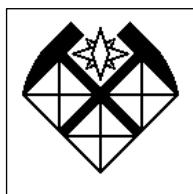


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ



**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ**

И.А. Доброхотова, К.В. Новиков

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Учебное пособие для студентов заочного обучения

Москва – 2009

УДК 550.837

Доброхотова И.А., Новиков К.В. Электроразведка. Учебное пособие.
М.: РГГРУ, 2009.

Оглавление

Введение.....	- 4 -
Глава 1. Основные понятия электроразведки	- 5 -
1.1. Геоэлектрический разрез.....	- 6 -
1.2. Прямая и обратная задача электроразведки.....	- 7 -
1.3. Электрические свойства среды.....	- 7 -
1.4. Классификация методов электроразведки	- 10 -
Глава 2. Методы сопротивлений	- 12 -
2.1. Физические основы методов сопротивлений.....	- 12 -
2.2. Электрическое профилирование	- 19 -
2.3. Электрические зондирования	- 21 -
Глава 3. Методы электрохимической поляризации	- 27 -
3.1. Метод естественного электрического поля.....	- 27 -
3.2. Метод вызванной поляризации.....	- 30 -
Глава 4. Магнитотеллурические методы	- 35 -
Глава 5. Электромагнитные зондирования.....	- 37 -
5.1. Частотное зондирование.....	- 38 -
5.2. Зондирование становлением электромагнитного поля.....	- 40 -
Глава 6. Индуктивные методы.....	- 42 -
6.1. Низкочастотные индуктивные методы	- 43 -
6.2. Метод переходных процессов.....	- 46 -
Глава 7. Радиоволновые методы.....	- 48 -
Справочные таблицы	- 50 -
Словарь сокращений принятых в электроразведке	- 51 -
Обозначения в электроразведке.....	- 52 -
Список литературы	- 53 -

Введение

Данное пособие предназначено для первичного ознакомления с дисциплиной «Электроразведка». Методическое пособие ориентировано на широкую аудиторию читателей, поэтому содержит минимальное число математических выкладок и формул, а внимание акцентировано на физической сути методов электроразведки, методиках проведения работ, основах обработки и интерпретации результатов исследований методами электроразведки.

Здесь будут рассмотрены основные методы электроразведки, одного из направлений прикладной геофизики. Геофизика в современном геологоразведочном процессе занимает важное место. Во-первых, она позволяет сократить затраты на бурение, которое является самой дорогой составляющей всего геологоразведочного процесса. Во-вторых, она может решать задачи глубинных исследований, которые не доступны прямым геологическим методам. Ведь представление о глубинном строении Земли практически полностью получено по результатам геофизических данных.

Ваши отзывы, пожелания и предложения, сообщения о найденных опечатках и неточностях присылайте по электронному адресу **egm.electro@gmail.com** .

Авторы выражают искреннюю благодарность Витковской А.А. за помощь в оформлении и редакции пособия.

Глава 1. Основные понятия электроразведки

Электроразведка (Электрометрия) – совокупность методов изучения строения земной коры и поисков месторождений полезных ископаемых, основанных на изучении естественных или искусственных электромагнитных полей. Физическая сущность электроразведки заключается в изучении зависимости электромагнитного поля, естественного или искусственного от электрических (а иногда и от магнитных) свойств среды, на которую это поле действует. По условиям проведения выделяют наземную, морскую, скважинную, шахтную и аэроэлектроразведку. По целевому объекту – рудную, структурную и инженерно-геологическую электроразведку.

Место электроразведочных работ в общем комплексе геологических исследований и их конкретные задачи определяются в каждом случае исходя из реальной геолого-географической обстановки, возможностей методов при решении поставленных задач в данных условиях, экономической целесообразности их применения с учетом стадии работ.

Электроразведка в своем составе имеет более 200 методов и их модификаций, которые характеризуются: видом электромагнитного поля, типом возбуждения поля, его измеряемыми компонентами, методикой и техникой полевых работ, способами обработки и интерпретации полученных данных, решаемыми геологическими задачами. Результатом электроразведочных работ должна быть геологическая информация, с целью ее извлечения из геофизических данных проводят интерпретацию результатов полевых наблюдений.

В геофизике в целом и в электроразведке в частности одним из основных является понятие нормального и аномального поля. В первом приближении под нормальным полем подразумевается *первичное* поле – поле источника в воздухе, а под *аномальным* – вторичное поле искомого объекта.

Но на практике все не так однозначно, потому что помимо нормального поля источника и аномального от объекта в суммарном поле присутствуют еще аномальные поля от вмещающих, перекрывающих пород, а также от различных помех. Поэтому в общем виде формула для суммарного поля будет иметь следующий вид:

$$H_{\Sigma} = H_0^{\text{ист}} + H_{\text{вмещ.пор}}^a + H_{\text{перекр.пор}}^a + H_{\text{тело}}^a$$

Однако при решении конкретных задач поля вмещающих и перекрывающих пород могут и не представлять интереса для исследователя, тогда их включают в нормальное поле. То есть, какую составляющую поля считать аномальной, определяется только набором решаемых задач.

Электроразведка для исследований использует электромагнитные поля различной природы. По происхождению их можно разделить на:

- естественные: магнитотеллурическое поле, возникающее в результате взаимодействия с Землей вихревых токов в ионосфере и грозových

- искусственные – поля, которые создаются при помощи заземленных линий, подключенных к источнику переменного или постоянного тока, незаземленных контуров, питаемых переменным током, а также антенн.

Выделяют несколько способов возбуждения электромагнитного поля:

- гальванический – источником служит питающая линия заземлениями на ее концах;
- индукционный, где источник поля – незаземленный контур переменного тока, создающий переменное электромагнитное поле;
- смешанный, где источник поля – длинная заземленная линия, питаемая генератором переменного тока, таких размеров, что доля индуктивного возбуждения сопоставима здесь с гальваническим.

1.1. Геоэлектрический разрез

Каждому изучаемому геологическому разрезу соответствует его модель – геоэлектрический разрез (рис. 1.1.1.). Геоэлектрический разрез, представляет собой совокупность электрических и геометрических характеристик горных пород и руд, слагающих данный разрез. На геоэлектрическом разрезе обозначаются основные границы пород, отличающихся по электромагнитным свойствам.

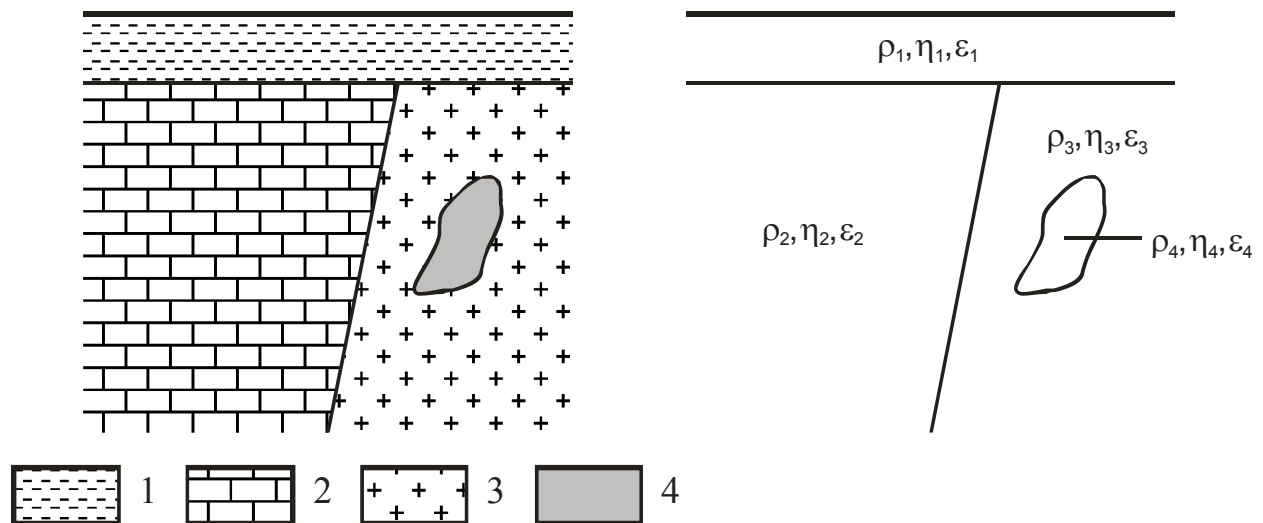


Рис.1.1.1. Геологический и геоэлектрический разрезы. 1 – глины, 2 – известняки, 3 – долериты, 4 – рудное тело.

Необходимо подчеркнуть, что заданному геологическому разрезу соответствует конкретный геоэлектрический разрез, но заданный геоэлектрический разрез определяет геологический неоднозначно. Это связано с

тем что некоторые породы и руды могут обладать схожими (или одинаковыми) физическими свойствами, но при это имеет различный состав. Поэтому переход от геоэлектрического разреза к геологическому требует наличия априорной геологической и петрофизической информации.

Исследования геоэлектрического разреза на глубину называются *зондированиями*, а в горизонтальном направлении на определенной глубине – *профилированиями*.

1.2. Прямая и обратная задача электроразведки

Прямая задача геофизики: по известному объекту с заданными физическими свойствами найти поле; обратная – по заданному полю найти параметры объекта. Решение прямой задачи однозначно, а решение обратной задачи, как правило, множественно и неустойчиво.

Применительно к электроразведке прямую задачу можно сформулировать следующим образом: нахождение единственно возможного суммарного электромагнитного поля, складывающегося из первичного поля известного источника и вторичного поля от геоэлектрического разреза. Обратная задача – определение параметров геоэлектрического разреза (геоэлектрической модели) по измеренному электромагнитному полю. Решение задач электроразведки ведется в рамках выбранной модели.

Модель – это совокупность принятых при решении прямой или обратной задачи упрощений и допущений. В зависимости от модели, выделяются одномерные (1D, 1M), двухмерные и трехмерные задачи, а иногда 2,5D и четырехмерные модели, которые кроме трех геометрических характеристик пространства учитывают время (4D или 3Dt). Для одномерной модели (1D) считается, что на поле влияют только породы в данной точке, причем их свойства изменяются только по вертикали. Для двухмерных моделей учитывается влияние не только по вертикали, но и по горизонтали (латерали) в одном направлении, а в трехмерных моделях учитывают влияние пород в пространстве.

1.3. Электрические свойства среды

Применение геофизических методов в целом, и электроразведки в частности, возможно потому, что породы имеют разные физические свойства.

Основными электрическими характеристиками среды являются:

- удельное электрическое сопротивление (ρ) – главный информационный параметр для большинства методов электроразведки;
- поляризация естественная и вызванная (η);
- диэлектрическая проницаемость относительная и абсолютная (ϵ_a , $\epsilon_{отн}$);

- магнитная проницаемость относительная и абсолютная ($\mu_a, \mu_{отн}$), которая формально является не электрической, а магнитной характеристикой, однако она оказывает влияние на электромагнитное поле;
- пьезоэлектрический модуль.

Электрические свойства геологической среды зависят от многих петрофизических факторов, таких как: минеральный состав; пористость; влагонасыщенность, удельное электрическое сопротивление вещества, заполняющего поры; структура и текстура породы; температура; давление.

Рассмотрим некоторые наиболее важные электрические свойства.

Удельное электрическое сопротивление. Способность вещества проводить электрический ток определяется наличием свободных зарядов, которые могут двигаться направленно под действием внешнего электрического поля. Сопротивление электрическому току, вызывается хаотическим (тепловым) движением заряженных частиц, а также столкновениями и взаимодействиями с другими частицами и зависит от строения электронной оболочки атомов, кристаллохимических структур минералов и ионизационных свойств водных растворов солей.

$$\rho = R \frac{S}{l},$$

где R – сопротивление, S – поперечное сечение тела, l – длина тела (рис. 1.3.1.).

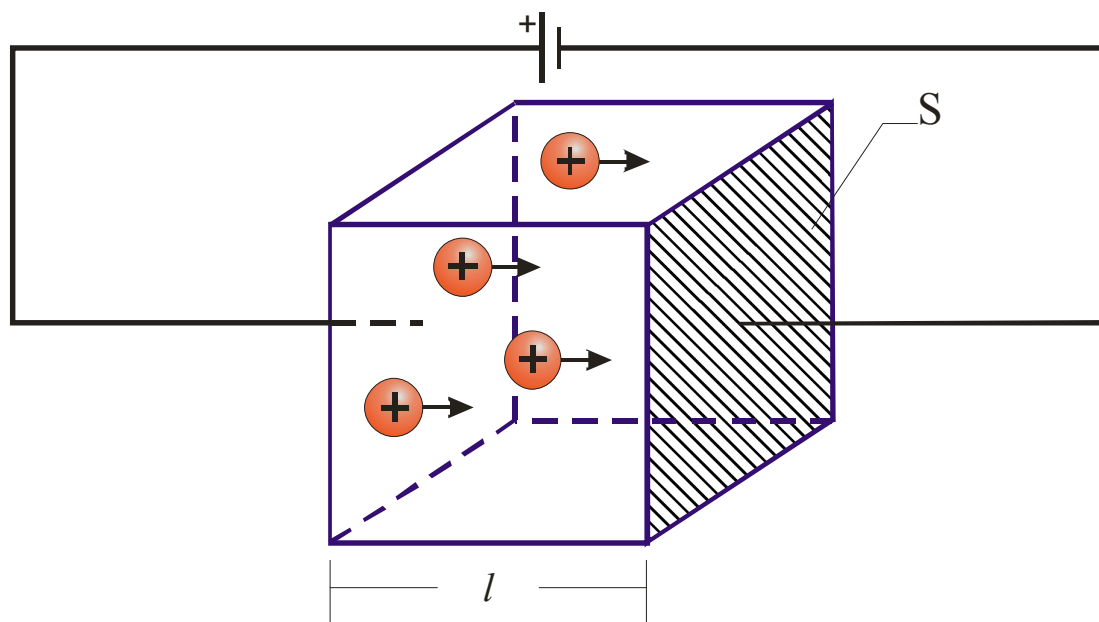


Рис. 1.3.1. К понятию об удельном электрическом сопротивлении.

Как видно из формулы *удельное электрическое сопротивление* ($УЭС$) – это сопротивление единичного объема горной породы (1 м^3) электрическому току, протекающему параллельно двум его граням. Измеряется в Омах·метр ($\text{Ом}\cdot\text{м}$).

Если сопротивление такого единичного объема породы одинаково во всех трех направлениях, то такая среда называется изотропной, если нет то

анизотропной.

Анизотропия горных пород может быть обусловлена их трещиноватостью, микро-слоистостью или рассланцованностью. В анизотропных средах параметры, характеризующие различные свойства среды, зависят от направления. Наиболее часто применяемой в теории моделью анизотропной среды является среда с осевой анизотропией (трансверсально-изотропная среда). Удельную электропроводность σ такой среды характеризуют два значения: σ_n – по направлению оси анизотропии n (ортогональному направлению трещин или границ прослоев) и σ_t – по любому, нормальному оси n направлению t . Такую среду можно характеризовать также двумя значениями удельного электрического сопротивления: поперечного $\rho_n=1/\sigma_n$ и продольного $\rho_t=1/\sigma_t$. [Каринский, 2004].

Величина анизотропии определяется коэффициентом анизотропии

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$$

где ρ_n – УЭС вкrest напластования или перпендикулярное направлению господствующей системы трещин, ρ_t – УЭС по напластованию или вдоль системы трещин, то есть перпендикулярно ρ_n .

Величина обратная УЭС называется удельной электрической проводимостью, она измеряется в Сименсах/м, См/м:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Поляризация. Поляризация бывает двух видов – естественная и вызванная.

Естественная поляризация – это свойство горных пород и руд создавать электрическое поле, которое обусловлено, главным образом фильтрационными, диффузионно-адсорбционными и окислительно-восстановительными процессами (обозначается $\Delta U_{пс}$, мВ). [6]

Вызванная поляризация – свойство горных пород и руд создавать вторичное электрическое поле под воздействием внешнего электрического поля (обозначается $\Delta U_{вп}$, мВ).

Так же часто используется параметр, который называется поляризуемость. *Поляризуемость* (η) – это параметр, равный отношению ЭДС поляризации $\Delta U_{вп}$ к разности потенциалов внешнего поля (ΔU тока пропускания, $\Delta U_{пр}$). Измеряется в долях или процентах (%). $\eta=(\Delta U_{вп}/\Delta U_{пр}) \cdot 100\%$. [6]

Диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость бывает относительная и абсолютная. Абсолютная диэлектрическая проницаемость (ϵ_a) определяется отношением электрической индукции поля \vec{D} к величине электрической напряженности поля \vec{E} . ϵ_a измеряется в Фарадах/метр, Ф/м.

$$\varepsilon_a = \frac{\vec{D}}{\vec{E}}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon_{\text{отн}}$) показывает, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия между электрическими зарядами в данной среде, по сравнению с вакуумом. Изменение силы взаимодействия зарядов связано с явлением поляризации вещества под влиянием электрического поля. Иными словами, $\varepsilon_{\text{отн}}$ показывает во сколько раз увеличится емкость конденсатора, если заменить воздух между его обкладками на данное вещество. $\varepsilon_{\text{отн}}$ – безразмерная величина.

Абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемость связаны соотношением

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{отн}},$$

где ε_0 – электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума)

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Магнитная проницаемость. Магнитная проницаемость, как и диэлектрическая бывает относительная и абсолютная. Абсолютная магнитная проницаемость (μ_a) определяется отношением магнитной индукции поля \vec{B} к величине напряженности магнитного поля \vec{H} . μ_a измеряется в генри/метр, Гн/м.

$$\mu_a = \frac{\vec{B}}{\vec{H}}$$

Относительная магнитная проницаемость ($\mu_{\text{отн}}$) показывает, во сколько раз увеличилось магнитное поле в результате намагничивания среды по сравнению с полем в вакууме. $\mu_{\text{отн}}$ – безразмерная величина.

Абсолютная и относительная магнитная проницаемость связаны соотношением

$$\mu_a = \mu_0 \mu_{\text{отн}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная или абсолютная магнитная проницаемость вакуума

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

1.4. Классификация методов электроразведки

Классификация методов электроразведки приведена на блок-схеме рис. 1.4.1, а физическая сущность, методики работ, обработка и интерпретации результатов будут рассмотрены в соответствующих главах.

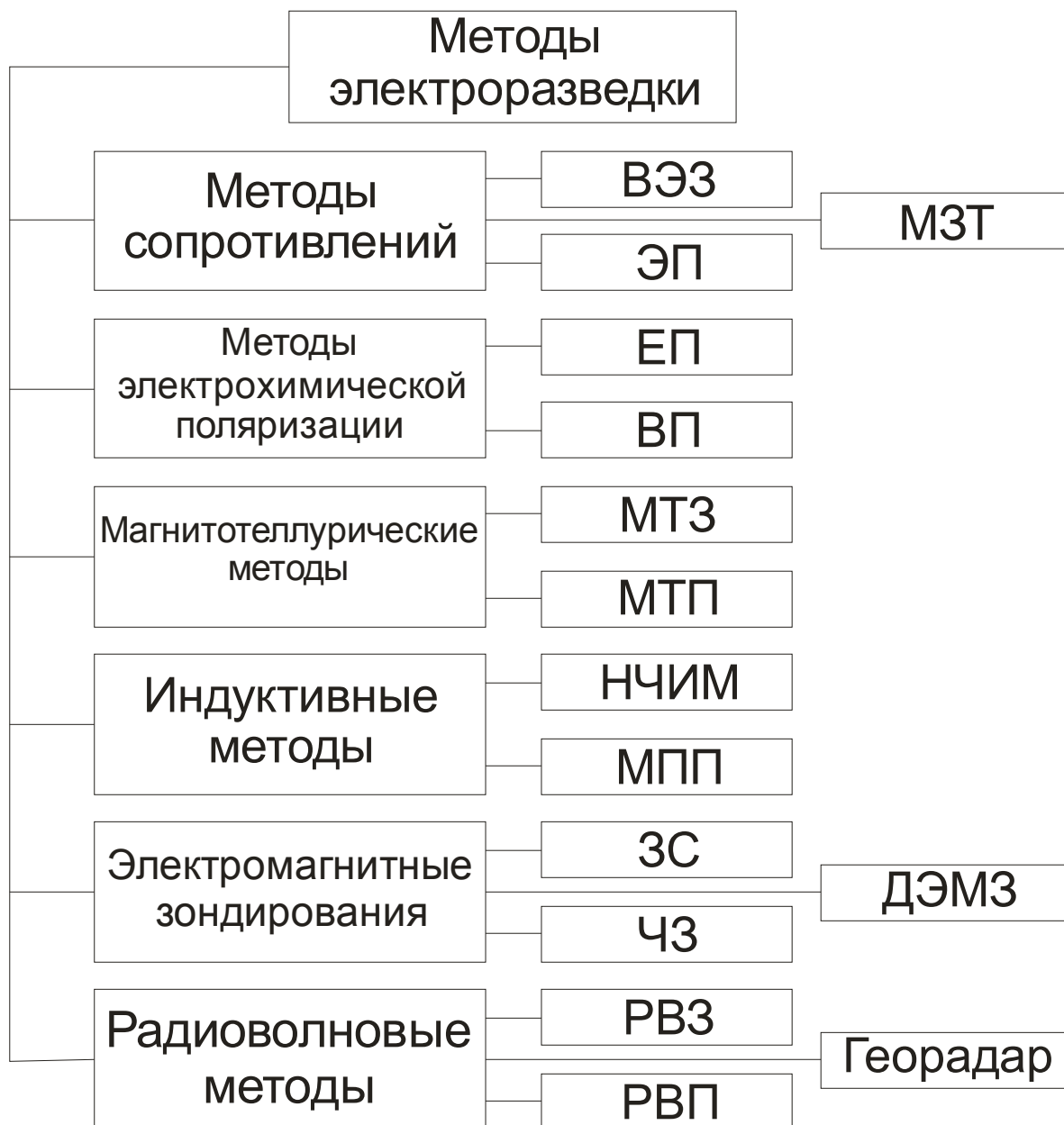


Рис.1.4.1. Классификация методов электроразведки.

Сокращения: ВЭЗ – вертикальное электрическое зондирование, ЭП - электропрофилирование, МЗТ – метод заряженного тела, ЕП – метод естественного поля, МТЗ – магнитотеллурическое зондирование, МТП - магнитотеллурическое профилирование, НЧИМ – низкочастотные индуктивные методы, МПП – метод переходных процессов, ЗС – зондирование становлением, ЧЗ – частотное зондирование, ДЭМЗ – дистанционные электромагнитные зондирования, РВЗ - радиоволновое зондирование, РВП – радиоволновое профилирование.

Глава 2. Методы сопротивлений

2.1. Физические основы методов сопротивлений

Методы сопротивлений – группа методов электроразведки изучающих геоэлектрический разрез с помощью постоянных электрических полей, они относятся к числу наиболее широко применяемых методов.

В качестве возбуждителя поля в методах сопротивлений используются точечные или дипольные электрические источники, которые представляют из себя два заземления A и B^1 , к которым подключен источник тока. Через них в землю пропускают постоянный или низкочастотный переменный ток I от какого-либо источника, например генератора. Созданное постоянное поле исследуется с помощью измерительных заземлений M и N . Совокупность заземлений называют четырехэлектродной установкой $AMNB$.

Одним из важнейших понятий в электроразведке в целом и в методах сопротивлений в частности является кажущееся удельное электрическое сопротивление. *Кажущееся удельное электрическое сопротивление* ρ_k – эффективный параметр, изучаемый при электроразведочных работах, а также электрическом каротаже, зависящий от способа измерений, типа и размера установки. Измеряется в Ом·м. Далее для краткости будем говорить просто *кажущееся сопротивление*. Для методов сопротивлений ρ_k определяется формулой.

$$\rho_k = k \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}}, \quad 2.1.1.$$

где k – коэффициент установки, ΔU_{MN} – разность потенциалов на приемной линии MN , I_{AB} – ток в линии AB .

Коэффициент установки определяется исключительно геометрией установки

В общем случае формула для коэффициента установки имеет вид

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}, \quad 2.1.2.$$

Питающая линия АВ

Питающая линия AB состоит из трех элементов: *источника тока, проводов и заземлений*.

Источник. Источники электроэнергии в электроразведке используются для создания искусственных постоянных или переменных электромагнитных полей. В качестве источников тока в электроразведке используются батареи и генераторы.

В методах электроразведки постоянными полями, наиболее часто

¹ обозначение введено братьями Шлюмберже

применяются точечные и дипольные источники возбуждения поля. Питающими установками в этих случаях являются установки с одним питающим электродом А (второй электрод В отнесен на «бесконечность»-расстояние, в 10–15 раз превышающее расстояние от точки наблюдения до электрода А), с двумя питающими электродами А и В и дипольные установки, когда расстояние между питающим и приемным диполями во много раз меньше расстояния до точки наблюдения.

Напряженность электрического поля \mathbf{E} и потенциал U (рис. 2.1.1.) для этих источников на поверхности однородного полупространства, заполненного средой с удельным электрическим сопротивлением ρ описываются формулами:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi x}; \quad \mathbf{E} = \frac{I\rho}{2\pi x^2} \quad \text{– точечный источник (рис. 2.1.1.а);} \quad 2.1.3.$$

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{|x|} - \frac{1}{|L-x|} \right); \quad \mathbf{E} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{x}{|x|^3} - \frac{L-x}{|L-x|^3} \right) \quad \text{– двухточечный источник (рис. 2.1.1.б);} \quad 2.1.4$$

$$U = \frac{I\rho l}{2\pi x^2}; \quad \mathbf{E} = \frac{I\rho l}{2\pi x^3} \quad \text{– дипольный источник (рис. 2.1.1.в),} \quad 2.1.5.$$

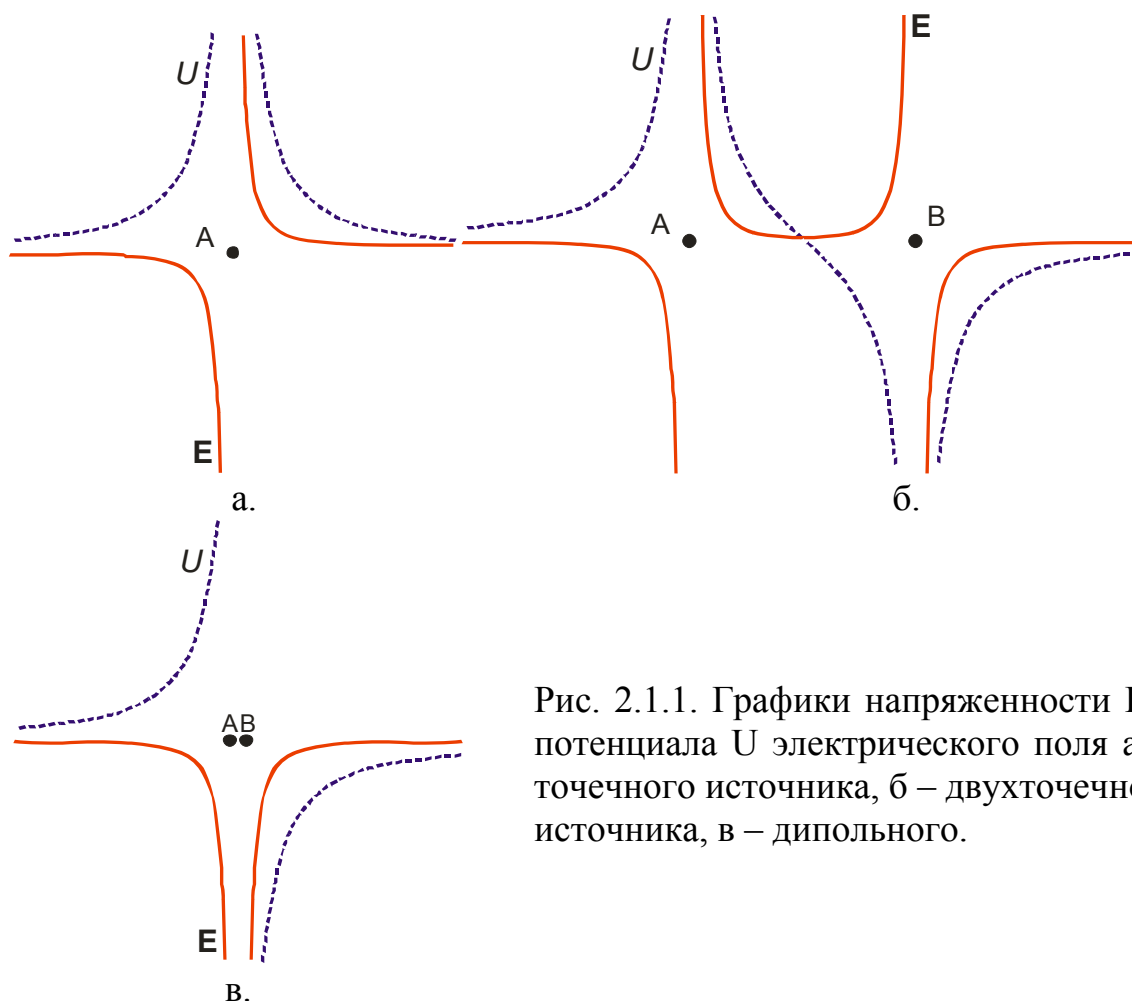


Рис. 2.1.1. Графики напряженности \mathbf{E} и потенциала U электрического поля а. – точечного источника, б – двухточечного источника, в – дипольного.

где ρ – удельное электрическое сопротивление однородного полупространства; E – напряженность электрического поля; U – потенциал электрического поля; I – сила тока в питающей установке; x – расстояние от источника А или центра диполя до точки наблюдения; L – расстояние между питающими электродами А и В (l – для диполя).

Оценку глубинности исследования при работе с точечными, двухточечными и дипольными установками можно произвести на основании анализа зависимости между плотностью тока на поверхности полупространства для какой-либо точки наблюдения x и плотностью тока в точке, расположенной на глубине h под точкой наблюдения x (на расстоянии A по вертикали, проходящей через точку наблюдения x).

Выражения для плотности тока будут выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{j} = \frac{I}{2\pi(h^2 + x^2)}, \quad 2.1.6.$$

(точечный источник);

$$\mathbf{j} = \frac{Il}{2\pi(x^2 + h^2)} \sqrt{1 + 3 \frac{x^2}{(x^2 + h^2)}}; \quad 2.1.7.$$

(дипольный источник)

$$\mathbf{j} = \frac{I \frac{L}{2}}{\pi \left(\left(\frac{L}{2} \right)^2 + h^2 \right)^{3/2}} \quad 2.1.8.$$

(двухточечный источник)

где \mathbf{j} – плотность тока в среде; h – глубина.

Провода. Для геофизических работ применяются специальные провода. Они должны быть *прочными* на разрыв, должны иметь *хорошую изоляцию* чтобы избежать повреждений и как следствие утечек, а так же должны иметь достаточно *низкое электрическое сопротивление*.

Как правило, используются медные провода со стальными жилами (для прочности на разрыв) в полиэтиленовой оболочке. Например, ГПМП – геофизический провод медный с полиэтиленовой оболочкой, ГПСМП – геофизический провод сталемедный с полиэтиленовой оболочкой, ГПСМПО – тоже, что и предыдущий, но облегченный.

Между собой провода соединяют путем связывания их стальных жил прямым узлом с последующей обмоткой медными жилами, а затем изолируют полихлорвиниловой изоляцией. Необходимо учитывать, что чем больше будет соединений, тем больше вероятность утечки и обрыва.

Геофизические провода [Якубовский, Ренард, 1991]

Марка провода	Диаметр, мм	Масса 1 км, кг	Сопротивление 1 км, Ом	Сопротивление изоляции, кОм	Разрывное усилие, Н	Назначение
ГПМП	5,6	73	3	100	1350	ЗС, МПП, ЧЗ ВП, ВЭЗ (AB=10 км)
ГПСМП	4,6	38	10	100	2000	То же ВЭЗ (AB=3÷10 км)
ГПСМПО	3,2	14	50	100	1000	ВЭЗ (AB=0,5÷1 км)
ПСРП-2	2,5	9,3	100	100	-	ВЭЗ (AB=0,5км)
ПСРП-1	1,4	5,5	300	100	-	То же

Заземления. В качестве заземлений используются металлические стержни, выполненные из меди, латуни или стали.

Сопротивление стержневого заземления рассчитывается по формуле

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{a}, \quad 2.1.9.$$

где ρ – удельное электрическое сопротивления почвенного слоя, l – глубина заземления электрода, a – диаметр электрода. На рис. 2.1.2. приведен график зависимости сопротивления заземления от глубины забивания электрода.

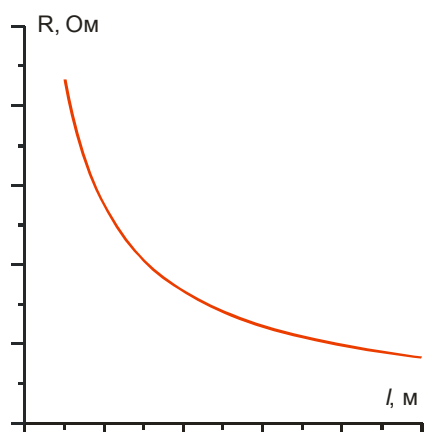


Рис. 2.1.2. график зависимости сопротивления заземления от заглубления электрода

При необходимости уменьшить сопротивление заземления используют различные приемы, такие как сложное заземление $R_3^{сл} = R_3/n$, состоящие из нескольких электродов, соединенных параллельно, увеличение заглубления электрода, а так же увлажнение места забивки электрода.

Приемная линия MN

Приемная линия MN представляет собой два точечных заземления, которые делаются из латунных или медных электродов.

Необходимо учитывать, что на контакте сред электрод – почва, возникает двойной электрический слой, вследствие чего электрод приобретает потенциал, а так как приемная линия состоит из двух электродов, то между ними образуется разность потенциалов, которая называется ЭДС поляризации. ЭДС поляризации имеет небольшие значения, порядка нескольких мкВ–мВ, но при измерениях слабого сигнала это может внести существенную ошибку, поэтому ЭДС поляризации либо компенсируют, либо устраняют другими способами. В некоторых методах, используются неполяризуемые электроды (см. гл. 3.1.).

Установки методов сопротивления

Для измерения кажущегося сопротивления используют ряд стандартных установок. Они отличаются друг от друга числом заземлений и их взаимным расположением. Выбор установки определяется поставленными геологическими задачами.

Четырехэлектродная симметричная установка $AMNB$ (установка Шлюмберже), является наиболее распространенной и состоит из приемных электродов MN , расположенных на одной линии с питающей линией AB , причем центры линий находятся в одной точке (рис.2.1.1.а.).

Для такой установки после преобразований коэффициент примет более простой вид:

$$k = \pi \frac{r_{AM} \cdot r_{AN}}{r_{MN}}, \quad 2.1.10.$$

Часто для увеличения информативности используют симметричную установку с двумя питающими разносимами $AA'MNB'B$, что позволяет изучать геоэлектрический разрез на двух глубинах (рис.2.1.1.б.).

Частный случай четырехэлектродной установки – установка Венера, в которой $r_{AM}=r_{MN}=r_{NB}=r$. Для установка Венера коэффициент будет рассчитываться еще проще:

$$k = 2\pi r, \quad 2.1.11.$$

Установка *срединного градиента* (СГ) представляет из себя четырехэлектродную установку, в которой два питающих электрода фиксированы, а измерительные располагаются вдоль профилей в пределах квадрата, сторона которого не превышает $AB/3$ (рис.2.1.1.в.). Коэффициент установки рассчитывается для каждой стоянки MN по полной формуле (2.1.12.). Установка СГ применяется в условиях сложных заземлений.

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}, \quad 2.1.12.$$

Трехэлектродная установка AMN, B_{∞} получается при отнесении одного из питающих электродов на такое расстояние, при котором создаваемая им между приемными электродами разность потенциалов была бы мала по сравнению с разностью потенциалов создаваемой вторым питающим заземлением. Тогда полем удаленного заземления можно пренебречь.

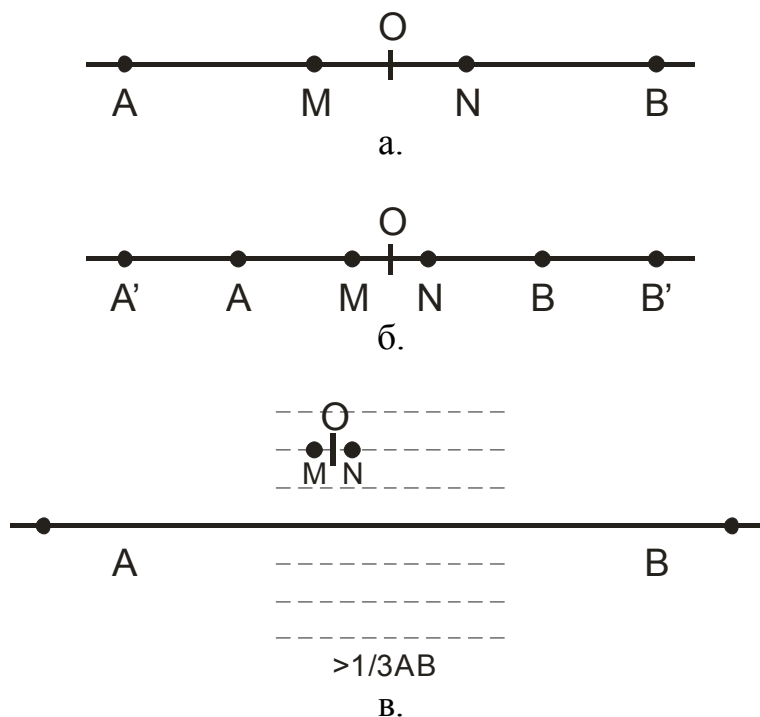
Коэффициент установки для трехточечной установки имеет вид:

$$k = 2\pi \frac{r_{AM} \cdot r_{AN}}{r_{MN}}, \quad 2.1.13.$$

Трехэлектродная комбинированная установка (рис.2.1.1.д.) получается из двух трехэлектродных установок $AMNC_{\infty}$ и $BMNC_{\infty}$. Измерения производятся поочередно с линиями $AMNC_{\infty}$ и $BMNC_{\infty}$. Подобный способ измерения эффективен для картирования вертикальных контактов и крутопадающих тел.

Двухточечная установка $AM, N_{\infty}, B_{\infty}$, отличается от трехточечной тем, что и одно питающее и одно измерительное заземление отнесены на «бесконечность». То есть, измеряя напряжение на MN_{∞} , фактически проводят измерения потенциала электрического поля U в точке M .

Также часто применяются дипольные установки, они характеризуются тем, что их приемные и питающие заземления попарно сближены настолько, что величины r_{AM} и r_{MN} намного меньше расстояния между центрами AB и MN .



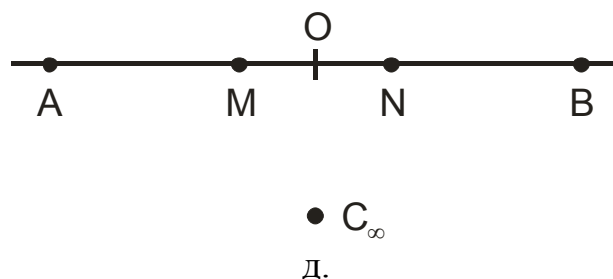


Рис.2.1.1. Схемы основных установок методов сопротивлений (в плане). а – симметричная четырехэлектродная установка, б – симметричная с двумя питающими разносами, в – установка срединного градиента, г – трехэлектродная установка комбинированного электропрофилирования,

Во всех случаях измерения стремятся проводить в более однородной части поля, поэтому измерительная линия не должна выходить за среднюю треть питающей.

Для всех установок справедлив принцип взаимности. *Принцип взаимности* гласит о том, что при взаимном изменении роли питающих и измерительных электродов кажущееся сопротивление сохраняет свое значение ($\rho_k^{AMNB} = \rho_k^{MABN}$).

Применение переменного тока в методе сопротивлений

В современных условиях на постоянном токе в методе сопротивлений уже почти не работают, а используют переменный ток низкой частоты, это позволяет при работе применять теорию для постоянного тока, и при этом получить ряд преимуществ. Во-первых, на переменном токе нет необходимости учитывать ЭДС поляризации электродов, во-вторых, появляется возможность фильтрации сигнала, что делает работы более помехоустойчивыми, в-третьих позволяет использовать менее мощные источники для больших разносов.

Однако применение переменного тока имеет и некоторые недостатки, в первую очередь это ограничение по длине питающей линии, что связано с тем, что при низких регистрируемых значениях поля, сигнал в приемной линии становится соизмерим с индуктивными наводками от питающей линии в приемную цепь и в землю. Поэтому стремятся использовать переменный ток как можно меньшей частоты. В нашей стране обычно применяется частоты 4.88 Гц и ниже.

Утечки тока из питающей линии и борьба с ними

Одной из существенных помех при электроразведочных работах являются утечки тока в питающей линии, они могут негативно влиять на результаты измерений и приводить к большим погрешностям и ошибкам. Утечки бывают *гальванические, емкостные и индуктивные*. Они могут быть связаны с нарушением целостности изоляции проводов, с плохими

контактами, высокой влажностью.

В методах сопротивлений есть несколько приемов проверки наличия утечек в питающей линии. *Первый способ заключается* в том, что дополнительно к основному проводят второе измерение при измененном сопротивлении питающих заземлений А и В, что должно приводить к пропорциональному изменению ΔU и I . Кажущееся сопротивление при этом не изменяется. *Второй способ контроля* за утечками заключается в том, что попеременно отключают заземления питающей линии и проводят измерения, подняв один конец провода в воздух. При отсутствии утечек разность потенциалов на приемной линии равно нулю.

При работе во влажных местах необходимо принимать повышенные меры против утечек. Так аппаратуру, катушки с проводами ставят на резиновые коврики. Кроме того, необходимо не допускать соприкосновения проводов питающей и приемной линии. Места соединения проводов, и контакты тщательно изолируют.

2.2. Электрическое профилирование

Электрическое профилирование (Электропрофилирование, ЭП) занимается изучением кажущегося сопротивления ρ_k разреза в горизонтальном направлении, вдоль линии профиля. Размеры и параметры установки, т.е. взаимное расположение питающих и приемных электродов остается постоянным.

Характер связи между кажущимся сопротивлением и строением геологического разреза зависит от типа установки, так например, над вертикальной границей разными типами установок будут получены разные графики ρ_k (рис. 2.2.1. и рис. 2.2.2.).

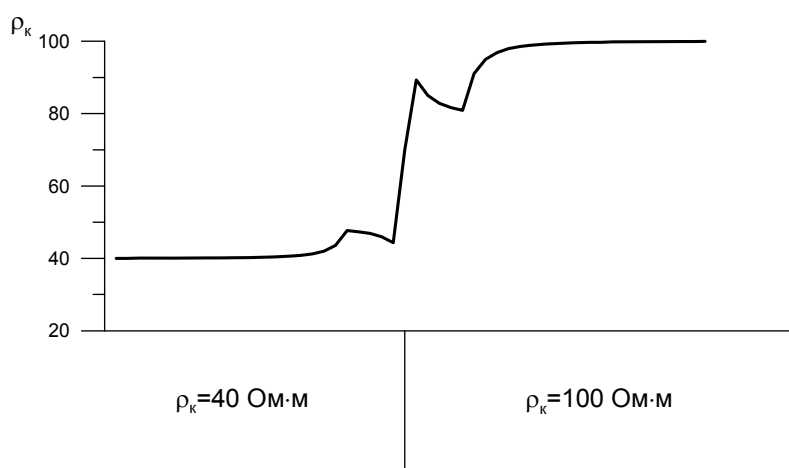


Рис. 2.2.1. График кажущегося сопротивления над вертикальной границей при профилировании 4х электродной установкой $AMNB$.

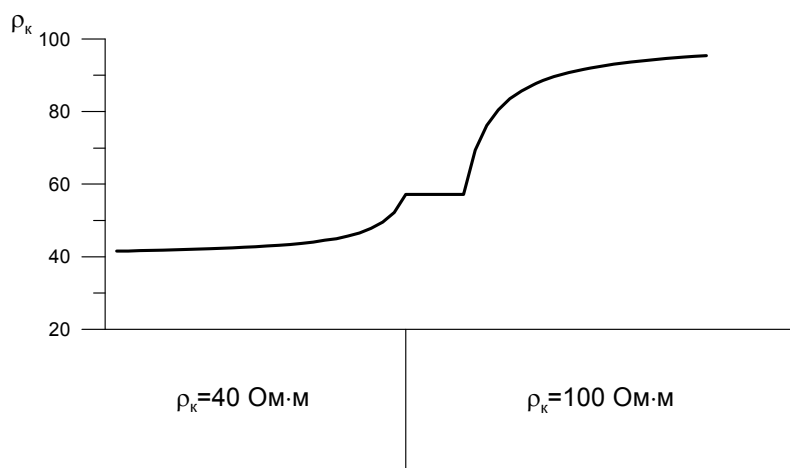


Рис. 2.2.2. График кажущегося сопротивления над вертикальной границей при профилировании 2-х электродной установкой AM (N и B в ∞).

Различные установки в электропрофилеировании позволяют более эффективно подчеркивать те или иные особенности геоэлектрического разреза, поэтому их применение обусловлено конкретными геологическими задачами. Выделяют симметричное электропрофилеирование (СЭП), комбинированное электропрофилеирование (КЭП), профилеирование методом срединного градиента (СГ). Наиболее часто применяют симметричное электропрофилеирование, как простой, быстрый и дешевый метод, ее применяют для изучения сравнительно простых геологических структур при условии постоянства сопротивлений перекрывающих отложений. Симметричную установку с двойными питающими разносами $AA'MNB'B$ используют для увеличения информативности СЭП. Установки СГ удобны на участках со сложным геоэлектрическим строением и большим количеством неоднородностей. КЭП применяют для отслеживания крутопадающих хорошо проводящих тел.

При инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях, для определения направления трещиноватости и рассланцеванности, применяют так же *круговое* профилеирование. Трещиноватые или рассланцеванные породы обычно обладают анизотропией, что является предпосылкой, для проведения кругового профилеирования.

Обработка и интерпретация результатов электрического профилеирования, в большинстве случаев является качественной и заключается в выделении областей повышенной или пониженной проводимости. Результатом работ являются, как правило, графики, карты графиков ρ_k или карты изом.

Электропрофилеирование может носить характер маршрутной или площадной съемки. При маршрутной съемки точки наблюдения расположены вдоль отдельных профилей, пересекающих площадь в наиболее интересных с геологической точки зрения местах. При площадной съемке площадь покрывают сетью точек наблюдения. Густота сети определяется искомой геологической структурой или рудным телом. Если искомые объект изометричны, то работы проводят по квадратной сети, а если вытяну-

ты, то по прямоугольной, с расстоянием между профилями большим, чем между точками наблюдения. В последнем случае профили располагаются в крест простираения.

Электропрофилирование решает задачи геологического картирования, обнаружения и картирования вертикальных границ, в том числе разрывных нарушений, инженерно-геологические и гидрогеологические задачи.

2.3. Электрические зондирования

Зондирование – это изучение геоэлектрического разреза по вертикали, то есть на глубину. В электроразведке существует два принципа зондирования: *геометрический* и *частотный*. Электрические зондирования в методе сопротивлений являются типичным представителем геометрических зондирований, то есть глубинность их исследований зависит от расстояния между приемными и питающими электродами, чем больше это расстояние – тем больше глубинность. Метод при котором проводятся многократные измерения с четырехэлектродной симметричной установкой при возрастающем расстоянии между питающими заземлениями и постоянном положении ее центра называется методом *вертикального электрического зондирования (ВЭЗ)*

В зависимости от применяемых установок электрические зондирования бывают: четырехточечные ($AMNB$), трехточечные (AMN, B_{∞}), двухточечные ($AM, N_{\infty}, B_{\infty}$), дипольные. Далее будем рассматривать четырехточечные (симметричные) зондирования, в которых изучают зависимость ρ_k от расстояния $AB/2$. Они получили наибольшее распространение в электроразведке.

Типы кривых ВЭЗ

Графики зависимости ρ_k от полуразноса $AB/2$ называются *кривыми ВЭЗ*. Тип кривых электрических зондирований зависит от соотношения параметров слоев в геоэлектрическом разрезе (рис. 2.3.1.). В зависимости от количества слоев в горизонтально слоистом разрезе его называют двухслойным, трехслойным, четырехслойным и т.д., также именуют и соответствующие кривые ВЭЗ. Кривые ВЭЗ строятся в билогарифмическом масштабе, с модулем² 6.25 см. По оси абсцисс откладывается $AB/2$ в метрах, а по оси ординат ρ_k в Ом·м.

² Модуль билогарифмического бланка – это расстояние между декадами, например, между 1 и 10, или 10 и 100, и т.д.

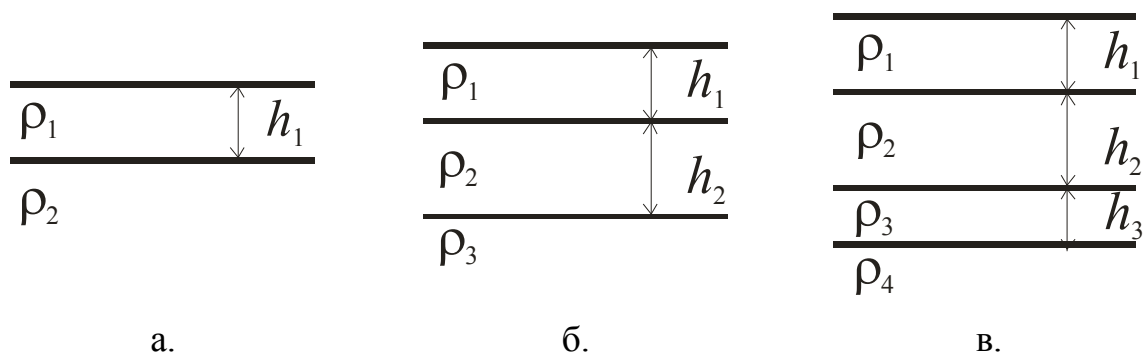


Рис. 2.3.1. Слоистые геоэлектрические разрезы: а – двухслойный, б - трехслойный, в – четырехслойный.

Рассмотрим некоторые типы кривых ВЭЗ и их особенности. Двухслойные кривые могут быть двух типов $\rho_1 > \rho_2$ (рис. 2.3.2.а), $\rho_1 < \rho_2$ (рис. 2.2.4.б). Отдельно можно выделить тип кривой, когда $\rho_2 \rightarrow \infty$, тогда правая ветвь кривой стремится к асимптоте под углом 45° . Необходимо отметить, что угол восхождения кривой ВЭЗ не может быть больше 45° , в противном случае измерения выполнены неверно или же есть какая-то помеха.

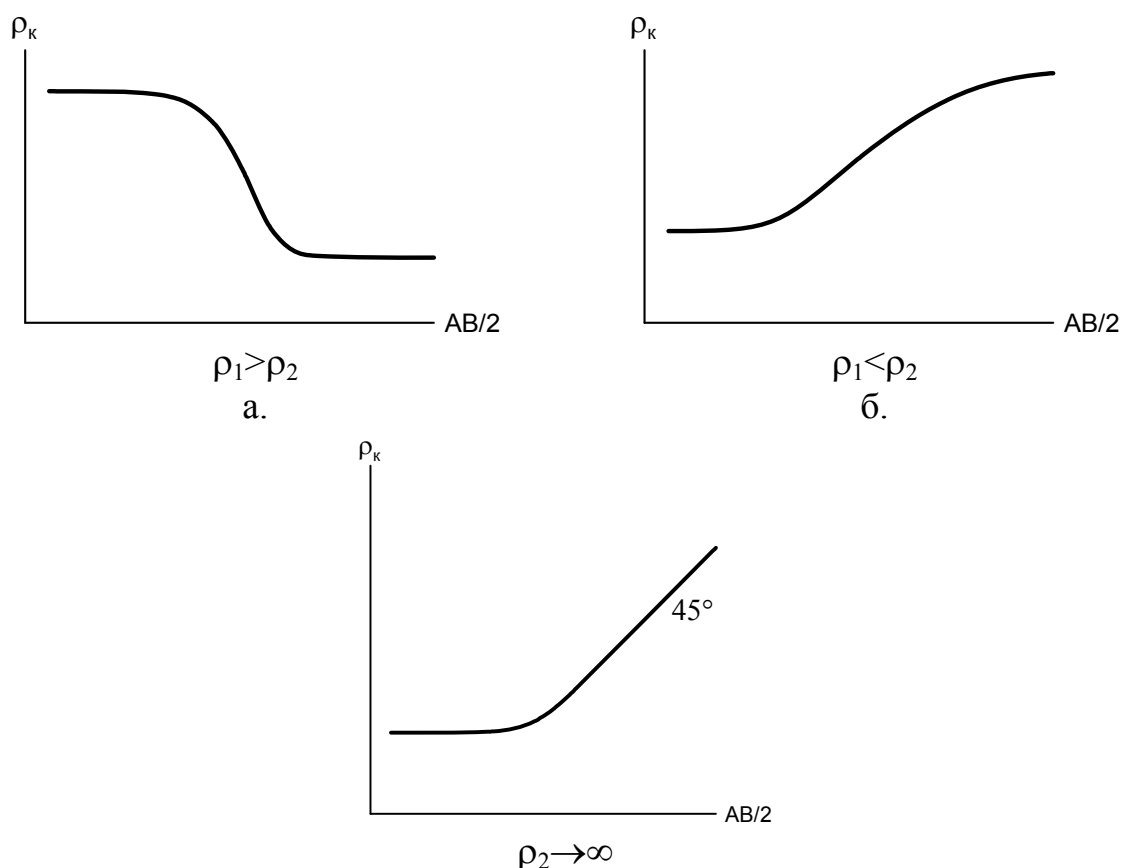


Рис. 2.3.2. Типы двухслойных кривых ВЭЗ

Для трехслойных геоэлектрических разрезов, в зависимости от соотношения параметров слоев, выделяют 4 типа трехслойных кривых, которые маркируются латинскими буквами Н, К, Q и А. (рис. 2.3.2.).

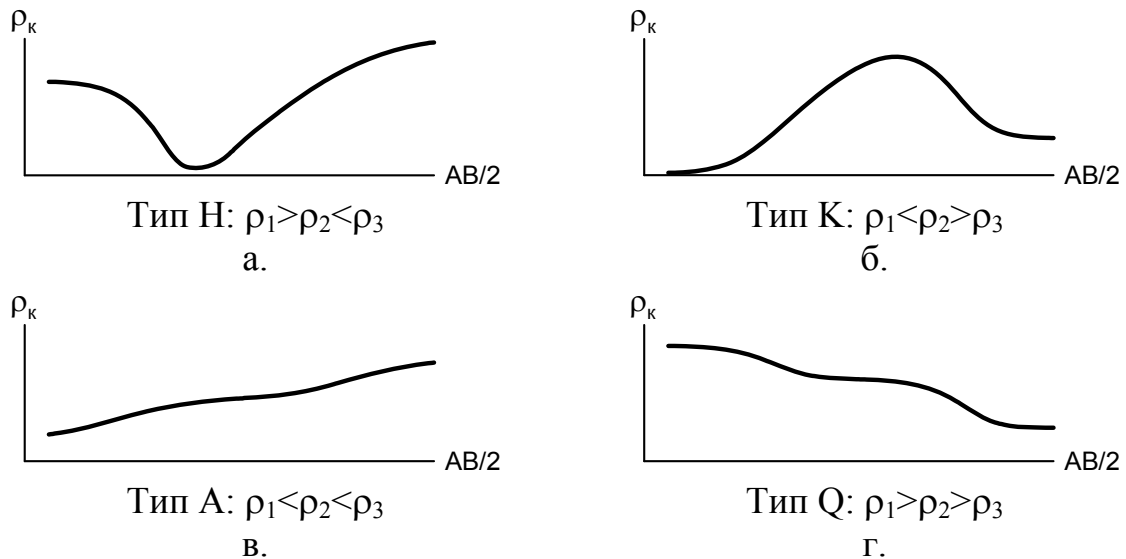


Рис. 2.3.3.. Типы кривых вертикального электрического зондирования.

Многослойные кривые маркируются несколькими буквами на основании разделения их на трехслойные кривые. Например, четырехслойные кривые могут быть НК (рис. 2.3.4.а), или НА (рис. 2.3.4.б.), а пятислойные НАА и т.д.

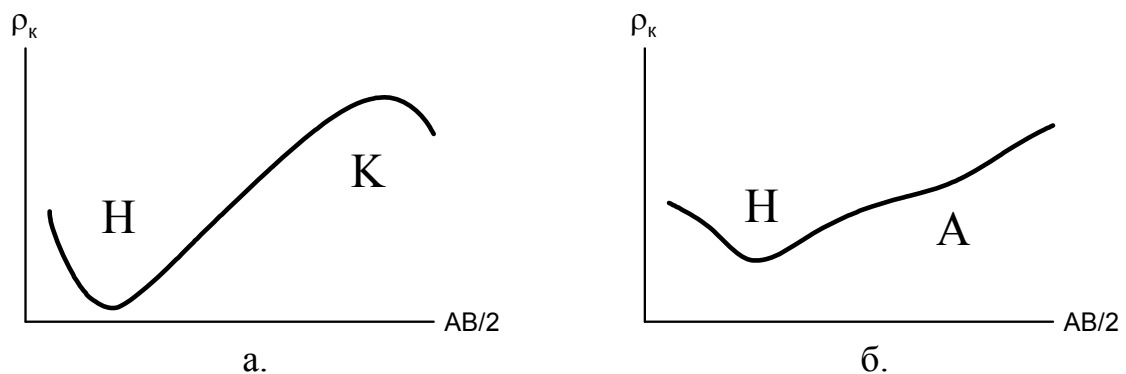


Рис. 2.3.4. Маркировка четырехслойных кривых ВЭЗ. а.– НК, б. – НА.

Продольная проводимость и поперечное сопротивление

В электроразведке в качестве характеристик геоэлектрического разреза часто применяются понятия продольной проводимости и поперечного сопротивления.

Продольная проводимость S однородного одиночного пласта – это проводимость этого пласта в направлении, параллельном напластованию.

$$S_i = \frac{h_i}{\rho_i}$$

Поперечное сопротивление T однородного одиночного пласта – это сопротивление данного пласта перпендикулярно напластованию.

$$T_i = \rho_i h_i$$

Если в многослойном разрезе ток течет параллельно напластованию, то электрическое поле на поверхности определяется суммарной продольной проводимостью разреза. Если же ток течет перпендикулярно напластованию, то электрическое поле на поверхности определяется в основном поперечным сопротивлением.

Принцип эквивалентности для слоистых разрезов

Электрические поля могут совпадать над различными геоэлектрическими разрезами, другими словами кривые ВЭЗ над такими разрезами будут одинаковы. Применительно к трехслойным геоэлектрическим разрезам принцип эквивалентности будет определяться параметрами второго (промежуточного) горизонта.

Для разрезов типа Н и А при равных параметрах первого и третьего горизонта эквивалентность определяется продольной проводимостью второго горизонта. Иными словами, кривые Н и А будут одинаковы, когда выполняется условие:

$$S_2 = \frac{h_2}{\rho_2} = const$$

Для разрезов типа К и Q при равных параметрах первого и третьего горизонта эквивалентность определяется поперечным сопротивлением второго горизонта. То есть, кривые будут одинаковы, когда выполняется условие:

$$T_2 = \rho_2 h_2 = const$$

Для многослойных геоэлектрических разрезов принцип эквивалентности будет гораздо сложнее, так как на форму кривой будут влиять все промежуточные слои.

Методика и техника полевых работ

Условия, благоприятные для применения метода электрического зондирования, следующие: пологие формы складчатости или подземного рельефа (углы наклона геоэлектрических границ до 20°), наличие опорного геоэлектрического горизонта, отсутствие экранирующих (высокого и низкого удельного сопротивления) горизонтов в надпорной толще. Метод вертикального электрического зондирования может применяться также для выявления структур с углами падения до 40 - 50°. В этом случае используется специальная методика с применением асимметричных установок.

Работы по методу ЭЗ проводятся на стадиях, связанных с геологическим картированием, с поисками и разведкой месторождений полезных ископаемых, при разведке структур, перспективных на нефть и газ, при съемках специального назначения: гидрогеологических и инженерно – геологических, а также при режимных наблюдениях за водными токами. Результаты зондирования используются для изучения электрических, вод-

но-физических и теплофизических свойств горных пород, а также для введения поправок в гравитационные наблюдения, оценки перспективности геохимических аномалий и т. д. [Инструкция, 1984]

ВЭЗ выполняется следующим образом, у точки зондирования устанавливаются измерительный прибор, генератор, катушки с проводами для разноса питающих электродов и на небольшом расстоянии друг от друга заземляются два приемных электрода. Затем вдоль направления MN растягивается питающая линия, устанавливается первый разнос AB и измеряется разность потенциалов ΔU на MN , а также сила тока I в AB , после чего рассчитывается ρ_k согласно формуле (2.1.2.) . Далее питающие электроды переносятся на следующий разнос, вновь определяется ρ_k и т.д.

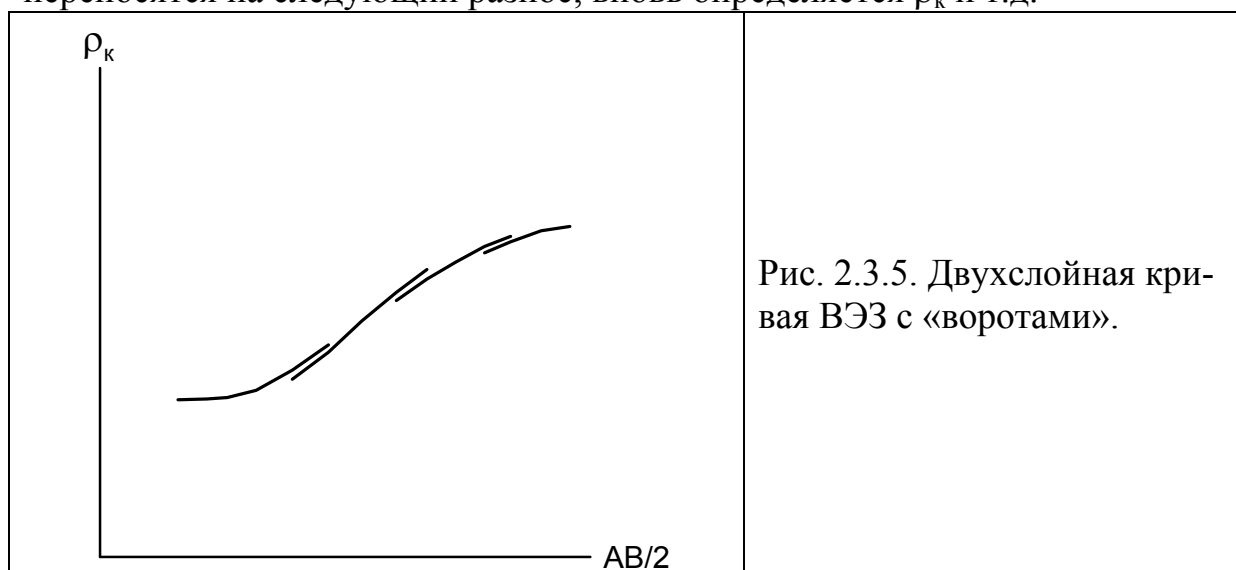


Рис. 2.3.5. Двухслойная кривая ВЭЗ с «воротами».

При отношениях около $AB/MN > 20$ разность потенциалов на приемных электродах становится достаточно маленькой, поэтому увеличивают разнос MN . При увеличении разноса приемной линии измерения проводят на двух разносах MN при одних и тех же разносах AB . То есть сначала проводят измерения на меньшем разносе MN , потом на большем разносе MN , после чего увеличивают разнос AB и снова проводят измерения сначала на большем разносе MN потом на меньшем. При этом образуются так называемые «ворота» на кривых ВЭЗ (рис. 2.3.5) – перекрытия точек на полевой кривой, связанные с изменением разноса приемной линии. При увеличении разноса приемной линии, необходимо помнить, что MN должна быть меньше $1/3$ питающей линии.

Размотку проводов при выполнении ВЭЗ следует вести по предварительно провешенному профилю или направлять по прямой с помощью естественных визиров или компаса. Следует избегать отклонения от прямолинейной прокладки проводов на угол, больший 10° .

При работе с большими разносами AB на переменном токе для уменьшения влияния индукции провода приемной линии MN следует относить в сторону по перпендикуляру к направлению разносов питающей линии на расстояние, не превышающее $0,1$ длины разносов питающих

Интерпретация данных ВЭЗ

Интерпретация кривых ВЭЗ подразделяется на качественную и количественную. Качественная интерпретация заключается в выделении пространственных закономерностей распределения тех или иных особенностей в виде карт типов кривых, карт продольной проводимости, карт изом, разрезов ρ_k и т.д. Количественную интерпретацию проводят с целью определения параметров геоэлектрического разреза – мощностей, сопротивлений горизонтов и глубины их залегания.

Ранее вся интерпретация проводилась «вручную» с помощью специальных наборов теоретических кривых – *палеток* (рис. 2.3.6.). Она проводилась методом подбора, т.е. экспериментальная кривая совмещалась с теоретической, на основании известных параметров разреза. Сегодня вся интерпретация проводится с помощью компьютера, но в большинстве случаев это также метод подбора.

Компьютерная интерпретация имеет несколько обязательных действий. Рассмотрим случай, когда УЭС ($\rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{n-1}$) промежуточных горизонтов известны:

1. Ввод кривой ρ_k ($AB/2, \rho_k$)- на экране, как правило, появляется кривая.
2. Составление стартовой модели геоэлектрического разреза, то есть задание $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$, по виду полевой кривой, на основе опыта интерпретатора или предыдущих моделей, с учетом того, что $\rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{n-1}$ – известны.
3. Расчет многослойной теоретической кривой ρ_k ВЭЗ, на основании созданной модели. Получение 2 кривых – теоретической и полевой (экспериментальной).
4. Сравнение ρ_k^T (теоретической) и $\rho_k^П$ (полевой) кривой. Исправление геоэлектрической модели на основании сравнения.
5. Продолжение цикла (3–4) до совпадения ρ_k^T и $\rho_k^П$ с заданной точностью.
6. Последняя модель является искомым геоэлектрическим разрезом.

При неизвестном удельном электрическом сопротивлении промежуточных горизонтов ($\rho_2, \rho_3, \dots, \rho_{n-1}$) возможно достоверно установить лишь продольную проводимость S или поперечное сопротивление T , а также пределы изменения ρ_i, h_i соответствующих горизонтов.

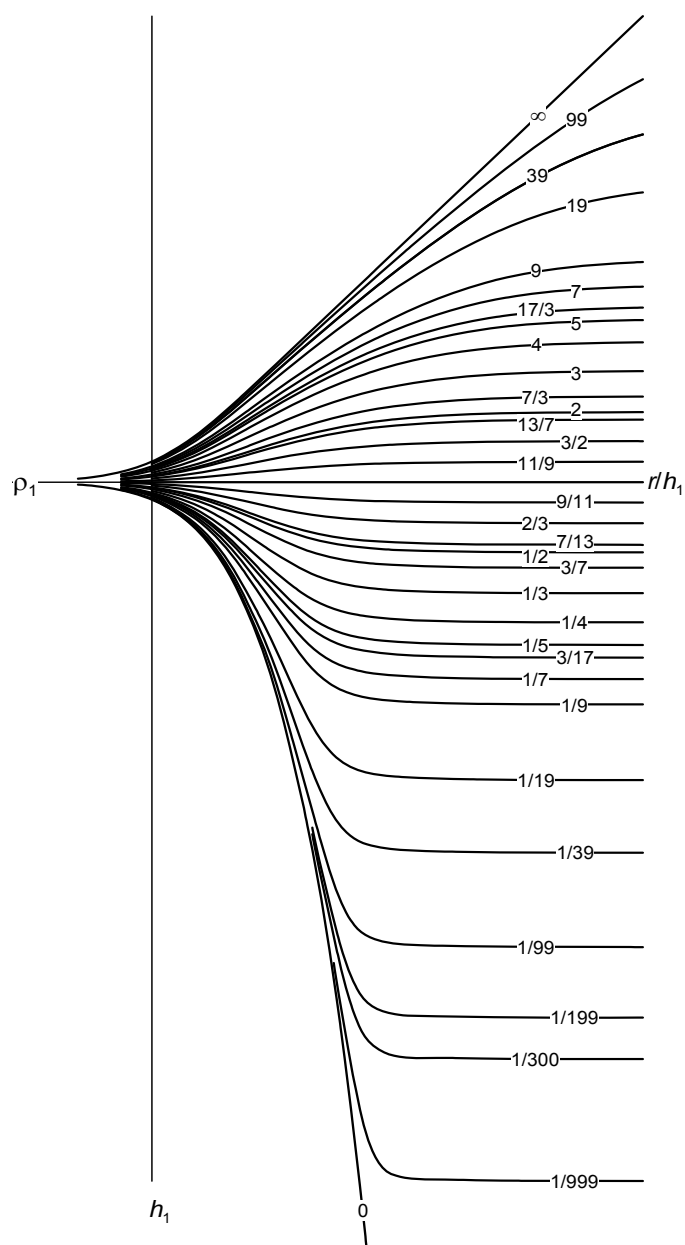


Рис. 2.3.6. Набор двухслойных теоретических кривых ВЭЗ.

Глава 3. Методы электрохимической поляризации

3.1. Метод естественного электрического поля

Сущность метода *естественного электрического поля* (ЕЭП, ЕП) заключается в изучении электрических полей, созданных естественными электродвижущими силами химического, фильтрационного и диффузионного происхождения с целью изучения геологических объектов, связанных с этими полями.

Изучение электрического поля производится посредством измерения разности потенциалов между различными точками дневной поверхности.

Так как в методе ЕП проводятся измерения очень малых величин, то

явление поляризации электродов будет существенной помехой, поэтому пользуются неполяризуемыми электродами. *Неполяризуемые электроды* представляют собой пористые фаянсовые сосуды, в которые вставлены медные стержни, верхняя часть которых закрыта изолирующим материалом. Сосуд заполняется насыщенным раствором медного купороса, который медленно фильтруется через стенки сосуда в землю. Таким образом, контакт медного штыря с землей производится через раствор медного купороса.

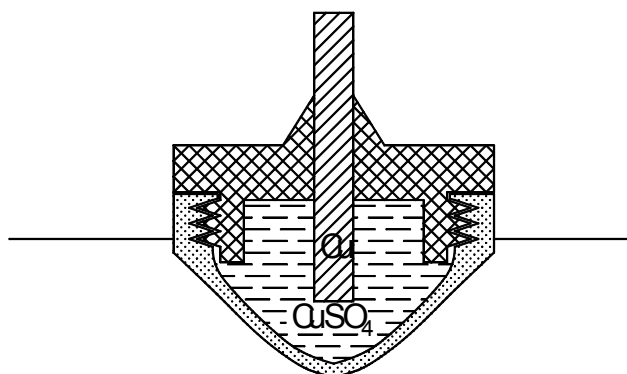


Рис.3.1.1. устройство неполяризуемого электрода

В неполяризуемых электродах электродвижущая сила, называемая поляризацией электродов, оказывается небольшой по величине и постоянной по времени, что позволяет исключить ее в процессе измерений естественного поля.

Методика съемок естественного электрического поля

Работы по методу ЕЭП проводятся наиболее часто в масштабах 1: 50000 – 1: 25000 – 1: 10000, а на аномальных участках сеть сгущают до 1: 5000 – 1: 2000. В отдельных случаях, например, при маршрутных съемках, они могут выполняться в более мелких масштабах.

Профили разбиваются вкрест известного или ожидаемого простирания изучаемых объектов.

Работы методом естественного поля могут выполняться двумя способами: способом потенциалов и способом градиентов потенциала.

При работе способом потенциала производят перемещение только одного переднего электрода M , второй электрод N остается неподвижен в одной точке. Перемещая электрод M по всем точкам наблюдений каждый раз измеряют разность потенциалов на MN . Если потенциал точки неподвижного электрода принять за нуль, то измеренные разности потенциалов будут соответствовать потенциалам точек наблюдений относительно точки электрода N (нулевой точки).

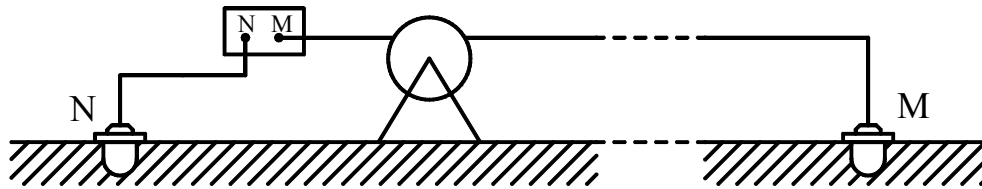


Рис. 3.1.2. Схема измерений естественного электрического поля способом потенциалов.

Детализационные работы на выявленных аномалиях должны производиться сразу после съемки планшета или той его части, в пределах которой находится аномалия. При детализационных работах в пределах небольших планшетов наблюдения проводятся с одной точки стояния электрода N . В этом случае результаты наблюдений получаются увязанными.

При работе методом ЕП питающая цепь отсутствует.

Обработка и интерпретация в методе ЕЭП

Обработка данных в методе ЕЭП заключается в построении графиков, карт графиков и карт эквипотенциальных линий естественного поля. При работе способом потенциалов дополнительной обработки данных не требуется.

Интерпретация результатов полевых наблюдений в методе естественного поля сводится в основном к качественным оценкам местоположения и формы объекта и некоторым количественным расчетам, целью которых, как правило, является определение глубины залегания вызвавшего аномалию объекта.

Порядок работы при этом следующий:

1. На картах эквипотенциальных линий и картах графиков потенциала ЕП выделяются аномальные участки.
2. По расположению и форме изолиний потенциала ЕП и графиков потенциала устанавливается местоположение объекта, вызвавшего аномалию, и производится суждение о форме тела.
3. Определяются глубина залегания объекта одним из известных способов: для сферической залежи глубину залегания до центра можно определить следующими способами:

- а) по длине хорды q , соединяющей те точки графика потенциала естественного поля ($U_{ЕП}$), где величина $U_{ЕП}$ достигает половины от максимального значения,

$$h = 0,65q ;$$

- б) по значению параметра m (рис. 4.1.),

$$h = 0,86m$$

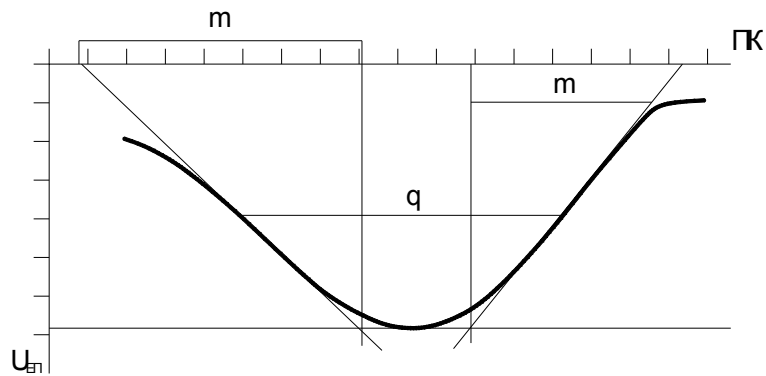


Рис 4.1. Нахождение параметров q и m по графикам $U_{\text{ЕП}}$

где m – отрезок в метрах, отсекаемый на линии профиля касательной, проведенной через точку перегиба на графике $U_{\text{ЕП}}$ и перпендикуляром, восстановленным на линию профиля из точки пересечения той же касательной и линии, параллельной профилю, проведенной через точку максимума $U_{\text{ЕП}}$;

- в) по скорости убывания потенциала на графике $U_{\text{ЕП}}$. Для этого следует определить величины X_1, X_2, X_3, X_4 – расстояния от нулевой точки, соответствующей положению максимума $U_{\text{ЕП}}$ точек, где величина $U_{\text{ЕП}}$ достигает соответственно 0,715, 0,355, 0,172, 0,084 от максимального значения:

$$X_1 = 0,5h; X_2 = h; X_3 = 1,5h; X_4 = 2h;$$

Применение метода ЕЭП

Метод естественного постоянного электрического поля применяется для поисков и разведки сульфидных месторождений, графитовых залежей и пластов антрацита и при геологическом картировании, а также при решении некоторых гидрогеологических задач, например, определение направления подземных потоков, выявление мест фильтрации воды из водохранилищ и др.. Необходимым условием для постановки работ методом ЕЭП является наличие геологической, гидрогеологической гидрохимической обстановки, благоприятствующей созданию достаточно интенсивных естественных электрических полей [Инструкция, 1984].

3.2. Метод вызванной поляризации

Метод вызванной поляризации (ВП) основан на изучении вторичных электрических полей, возникающих в горных породах под действием электрического тока и имеющих электрохимическое происхождение. Процессы ВП наиболее интенсивны на контакте внутрипорового электролита с минералами, обладающими высокой электронной или дырочной проводимостью. К таким минералам относятся большинство сульфидов, некоторые окислы, графит. Процессы ВП на контакте электролита с минералами низ-

кой удельной электропроводности имеют электрокинетический характер, их интенсивность в значительной степени зависит от состава и концентрации электролита и от структуры пор.

Для образования вторичных зарядов необходимо, чтобы первичное поле было постоянным или достаточно низкочастотным, а изучаемая среда – двухфазной.

Если в разрезе присутствует проводящее тело, то при пропускании электрического тока оно заряжается (поляризуется), т. е. на его поверхности образуется двойной электрический слой. Вследствие этого тело становится источником вторичных токов. После выключения питающего тока вторичные токи сохраняются в течение некоторого времени, измерение которых позволяет оценивать поляризуемость (Рис. 3.2.1.).

Поляризация бывает двух видов: поверхностная и объемная. Объемная поляризация характерна для горных пород, являющихся ионно-проводящими телами, и для вкрапленных руд. Поверхностная поляризация – для геологических образований, являющихся электронными проводниками, и для сплошных руд.

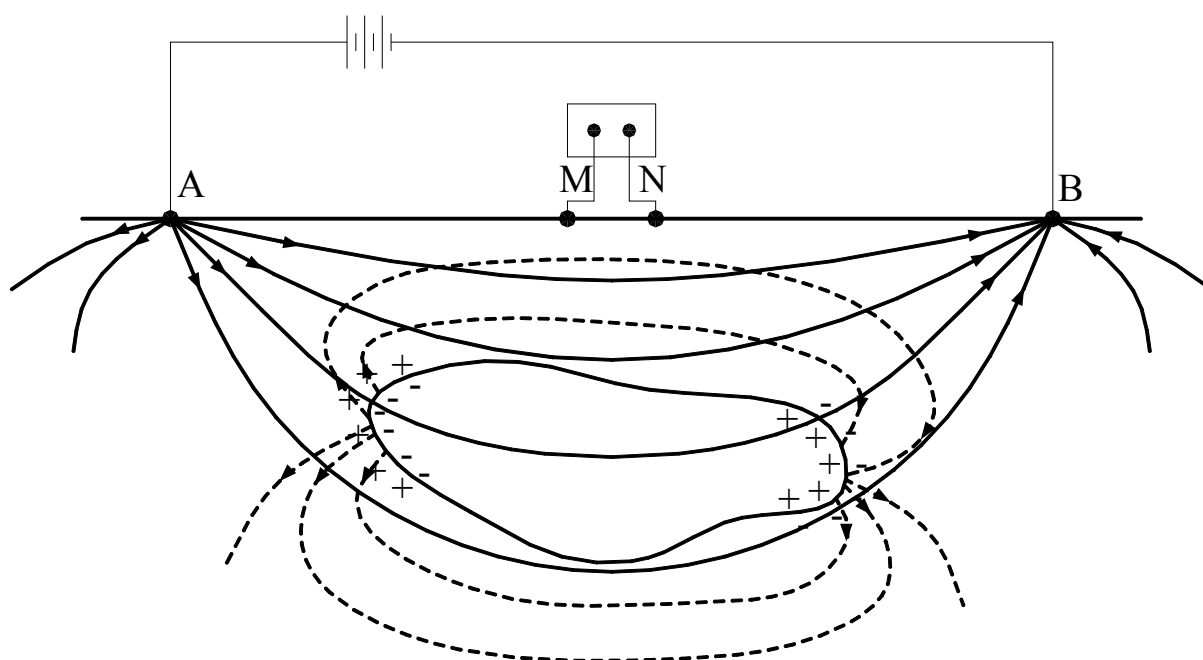


Рис.3.2.1. Схема возникновения поля вызванной поляризации и способ его наблюдения.

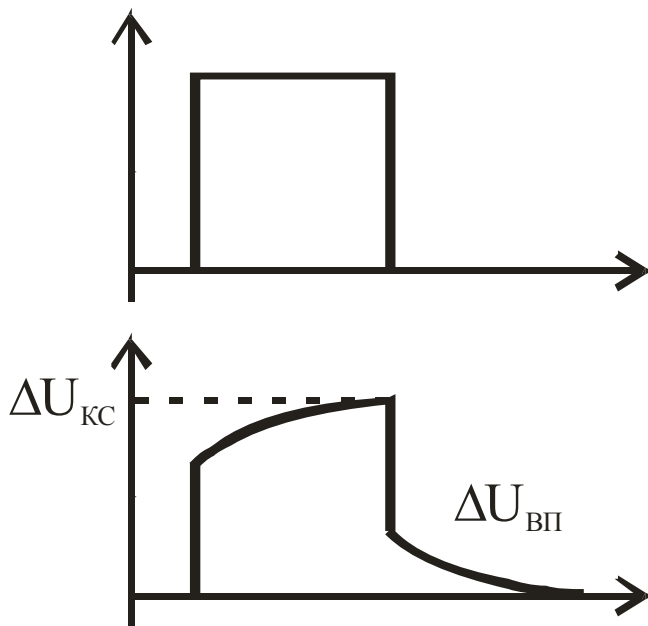


Рис.3.2.2. Импульсное измерение ВП. Наверху импульс без эффекта ВП, внизу – с эффектов ВП.

При работе с постоянными или импульсными полями для поляризации геологической среды через электроды А и В в землю пропускают импульсы постоянного тока. Во время пропускания тока, между приемными электродами MN возникает разность потенциалов, определяемая геологическим разрезом, установкой, и током, т.е. та разность потенциалов, которую измеряют в методах сопротивлений, обозначим ее $\Delta U_{КС}$. По окончании процесса поляризации питающий ток выключается и на приемной линии MN измеряется разность потенциалов $\Delta U_{ВП}$. Процентное соотношение $\Delta U_{ВП}$ и $\Delta U_{КС}$ называется поляризуемостью η . $\Delta U_{ВП}$ является убывающей во времени величиной. Измерения принято проводить спустя 0,5 секунды после выключения тока

$$\eta = \frac{\Delta U_{ВП}}{\Delta U_{КС}} \cdot 100\% . \quad (3.2.1.)$$

Фазовый способ измерения реализуют при работе переменными полями. В данном случае поляризуемость пропорциональна разности фаз между током и напряжением гармонического сигнала.

$$\eta = -2,5\Delta\varphi_{ВП} = -2,5(\varphi_{В} - \varphi_{Н}) \quad (3.2.2.)$$

Иногда изучают частотно-поляризационный эффект, пропорциональный величине η . Сущность методики заключается в том, что проводятся измерения разности потенциалов ΔU на двух частотах – на низкой ($10^{-2} \div 1$ Гц) и на высокой ($10 \div 100$ Гц). На высоких частотах эффект ВП гораздо меньше, поэтому и значения $\Delta U(\omega_{В})$ будут меньше.

$$PFE = \frac{\Delta U(\omega_{Н}) - \Delta U(\omega_{В})}{\Delta U(\omega_{Н})} \cdot 100\% \text{ или} \quad (3.2.3.)$$

$$PFE = \frac{\rho_{к}(\omega_{Н}) - \rho_{к}(\omega_{В})}{\rho_{к}(\omega_{Н})} \cdot 100\%$$

Методика работ

Работы методом ВП, как правило, проводят такими же установками, что и в методах сопротивлений или в дополнение к самим методам, поэтому методика работ ВП практически аналогична методике работ методами сопротивлений.

Особенностью методики работ методом ВП является то, что осуществляются измерения разности потенциалов как в момент прохождения тока, так и после его выключения и силы тока в цепи АВ. Величина тока, как правило, в несколько раз больше, чем при работе методами сопротивлений.

Выделяют модификации ЭЗ–ВП, ЭП–ВП, СГ–ВП.

Интерпретация в методе вызванной поляризации

В процессе интерпретации результатов полевых работ методом ВП желательно оценить форму, размеры, положение в пространстве и вещественный состав геологических объектов, явившихся причиной существования аномалии кажущейся поляризуемости. Некоторые приемы подобной интерпретации рассматриваются в настоящем задании.

В процессе интерпретации результатов полевых работ методом ВП желательно оценить форму, размеры, положение в пространстве и вещественный состав геологических объектов, явившихся причиной существования аномалии кажущейся поляризуемости.

Рассмотрим некоторые способы определения формы тела и глубины залегания:

1. *Определение формы тела.* Предположение о форме поляризуемого тела можно высказать на основании анализа формы графиков распределения η_k и ρ_k и протяженности аномалии в плане. При анализе сравниваются теоретические графики η_k и ρ_k над телами правильной геометрической формы с полевыми графиками и определяется протяженность вызвавшего аномалию объекта по карте графиков. После сравнения высказывается предположение о форме тела (изометрической, эллипсоидной, пластовидной и т.д.).

2. *Определение глубины залегания локального объекта.* Для приближенной оценки глубины залегания верхней кромки локально объектов рекомендуется использовать графики ВЭЗ–ВП, выполненных в центральных частях аномальных зон. Глубина залегания верхней кромки поляризуемого объекта h приблизительно равна полуразносу АВ/2, при котором на графике зондирования располагается точка перегиба (рис. 3.2.3.а.).

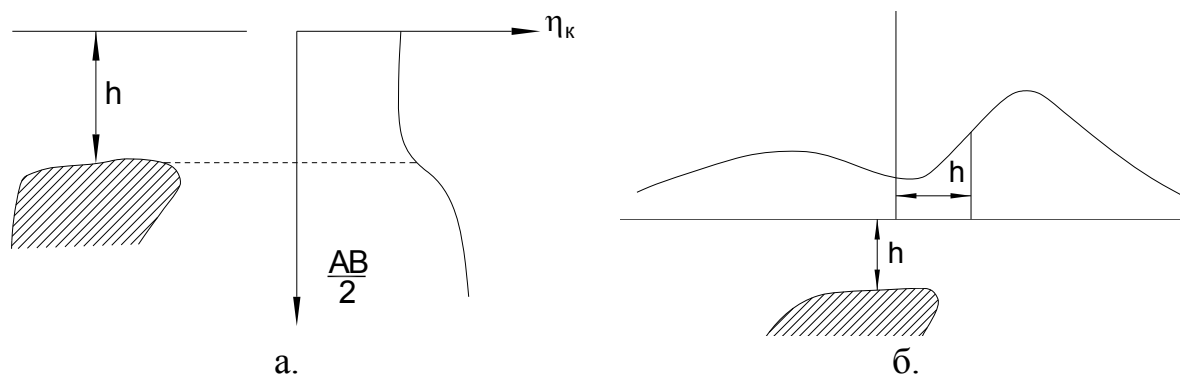


Рис. 3.2.3. Определение глубины залегания локального объекта.

Для оценки глубины залегания локального объекта рекомендуется выполнить профилирование в поле неподвижного питающего электрода, расположенного непосредственно над поляризующимся телом. На графиках η_k , которые в этом случае по смыслу близки к графикам ВЭЗ-ВП, глубина до верхней кромки тела приблизительно равна расстоянию от питающего электрода до точки перегиба (рис. 3.2.3.б.).

Применение метода вызванной поляризации

Метод ВП может применяться на всех стадиях геологоразведочного процесса – от изучения геологического строения районов с целью оценки их рудоперспективности, выявления площадей и участков, перспективных на нахождение месторождений, поисков месторождений полезных ископаемых до получения данных о морфологии и элементах залегания рудных тел и оценки их промышленной значимости, изучение флангов и глубоких горизонтов эксплуатируемых месторождений, уточнения контуров рудных тел.

Метод вызванной поляризации применяется при поисках вкрапленных рудных тел, выполняет задачи геологического картирования, решает мерзлотные задачи, может использоваться при поисках нефтегазовых месторождений, над которыми в результате разгрузки нефтепродуктов возникает сульфидизация, применяется также для решения гидрогеологических и инженерных задач, например для определения уровня грунтовых вод, литологического расчленения разреза песчано-глинистых отложений, количественной оценки засоленности пород зоны аэрации и степени минерализации подземных вод.

Работы по методу ВП могут быть площадными и профильными. При площадных съемках сеть наблюдений зависит от масштаба геологосъемочных и поисковых работ (от 1: 200000 до 1:5000 и крупнее), в соответствии со стадийностью проводимых работ.

Профильные измерения по методу ВП проводятся обычно для целей рекогносцировки, а также при детализационных работах и проверке аномалий, выявленных другими методами.

Глава 4. Магнитотеллурические методы

Магнитотеллурические методы основаны на изучении естественного переменного электромагнитного поля, источником которого являются токи в ионосфере, возникающие из-за космического излучения. Рассмотрим магнитотеллурические методы на примере магнитотеллурического зондирования.

При выполнении МТЗ регистрируют вариации двух горизонтальных составляющих теллурического поля E и двух или трех составляющих магнитного поля H с периодом от долей секунд до десятков минут. Глубинность зондирования определяется периодом регистрируемого сигнала.

По наблюдениям, выполненным в одной точке, определяют величины, характеризующие соотношения между спектрами электрического и магнитного полей. Зависимость этих величин от периода изображают в виде амплитудных и фазовых кривых МТЗ, являющихся частотными характеристиками исследуемого разреза. Благодаря скин-эффекту кривые МТЗ отображают изменения удельного электрического сопротивления горных пород с глубиной.

Так как источник поля находится достаточно далеко и выполняется условие дальней зоны, то поле источника можно представить в виде плоской электромагнитной волны. *Плоская волна* – гармоническое электромагнитное поле все элементы которого меняются только в одном направлении, совпадающем с направлением распространения волны. В качестве основной характеристики плоской электромагнитной волны и степени воздействия на нее проводящей среды пользуются импедансом. *Импеданс Z* – отношение двух взаимно перпендикулярных компонент поля, например, E_x к H_y :

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}.$$

Через импеданс выражают некоторый эффективный параметр, имеющий смысл кажущегося удельного электрического сопротивления ρ_T :

$$\rho_T = \frac{|Z|^2 T}{2\pi\mu_0} = \frac{|Z|^2}{\omega\mu_0},$$

где T – период волны, Z – импеданс.

Принцип эквивалентности в МТЗ. Как и в методах сопротивлений в МТЗ существует принцип эквивалентности. Для разрезов типа Н и А справедливо выполнение принципа эквивалентности по S_2 , то есть при условии постоянства продольной проводимости второго горизонта S_2 .

Иначе обстоит дело с разрезами К и Q. Как известно для этих разрезов при выполнении условий $\rho_2 \gg \rho_3$ и $h_2 k_2$ – мало (где k_2 – волновое число), принцип эквивалентности для немагнитных сред гласит, что для разных геоэлектрических разрезов, характеризующимися различными величинами удельных электрических сопротивлений промежуточного горизонта,

принцип эквивалентности выполняется если мощность этого горизонта h_2 остается постоянной. (В отличие от метода ВЭЗ, где для разрезов типа К и Q выполняется принцип эквивалентности по $T_2 = h_2 \rho_2$ – поперечному сопротивлению второго горизонта.)

Методика и техника работ МТЗ

При работах методом МТЗ приемные линии E_x и E_y выкладываются в виде буквы Г вдоль взаимно перпендикулярных осей x и y . Угол между осью x и широтным направлением не должен превышать 45° . В районах с устойчивой линейной поляризацией поля одну из осей ориентируют по направлению оси поляризации. Можно использовать Г-образную или крестообразную установки. Крестообразная установка имеет преимущества в сильно заселенной, заболоченной местности из-за меньшей вероятности ошибок в длине и азимуте приемных линий. Точность раскладки проводов по заданному направлению $\pm 3\%$, что достигается размоткой их по заранее намеченным ориентирам. В густом кустарнике предварительно прорубают визирную линию. Длину приемных линий определяют по меткам на проводах. В районах с интенсивными магнитотеллурическими вариациями, но со сравнительно однородными поверхностными геоэлектрическими условиями оптимальная длина линии установки не должна превышать $0,3 - 0,5$ км. В районах с низким уровнем магнитотеллурического поля, с неоднородными поверхностными условиями, например с островной многолетней мерзлотой, длина приемной установки может достигать $0,8 - 1$ км. Приемные линии заземляют чаще всего с помощью неполяризующихся электродов (летом) или металлических штыревых электродов (зимой) [Инструкция, 1984].

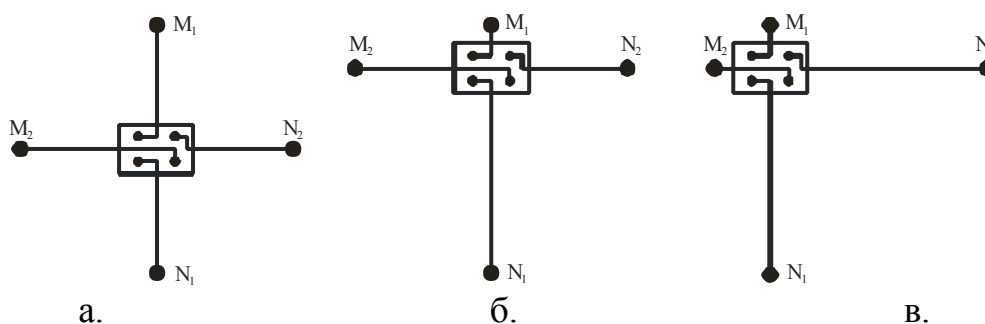


Рис. 4.1. Установки для работы методом МТЗ

Датчики для регистрации вариаций H_x , H_y , H_z устанавливают в неглубоких ямах на устойчивых твердых основаниях, на расстоянии между ними не менее 3 м и ориентируют при помощи съемочной буссоли с погрешностью до $\pm 0,5^\circ$. Азимут датчика для измерения H_x должен совпадать с азимутом оси x , азимут для измерения H_y – с азимутом оси y . Яма делается такой глубины, чтобы в ней можно было установить датчик и закрыть яму щитами и клеенкой, которые не должны касаться корпуса магнитомет-

ра, После окончания работ ямы засыпают ранее вырытой землей и закладывают ранее снятым дерном.

Обработка и интерпретация данных МТЗ

Количественная интерпретация результатов магнитотеллурических методов исследований сводится к построению обобщенной и послойной модели вертикального геоэлектрического разреза. При интерпретации кривых МТЗ определяют суммарную продольную проводимость S отложений, перекрывающих опорный горизонт высокого удельного сопротивления, мощность d отложений, перекрывающих опорный горизонт низкого удельного сопротивления, удельное сопротивление опорного горизонта, а также мощность и удельное электрическое сопротивление слагающих геологический разрез отложений.

Применение метода МТЗ

МТЗ применяются для изучения характера геоэлектрического разреза, выделения комплексов пород различного удельного сопротивления и картирования рельефа опорных геоэлектрических горизонтов (поверхности основания высокого удельного или непосредственно перекрывающей его толщи пород высокого сопротивления и кровли пород низкого удельного сопротивления в осадочном чехле), положения геоэлектрических слоев в земной коре и в верхней мантии Земли. Метод МТЗ является наиболее глубинным методом электроразведки, поэтому он часто решает задачи регионального картирования.

Глава 5. Электромагнитные зондирования

Электромагнитные зондирования представляют собой способы исследования геоэлектрических разрезов в вертикальном направлении посредством изучения электромагнитных полей³. Главными чертами электромагнитных зондирований являются: использование скин-эффекта (во временной или частотной областях); применение дипольных источников и приемников поля (как магнитных, так и электрических); представление результатов наблюдений в виде зависимости эффективных параметров среды (ρ_ω или ρ_τ) от достигаемой глубинности исследования; возможность изучения разрезов с высокоомными экранами.

Выполняемые в ближней зоне магнитного гармонического диполя дистанционные электромагнитные зондирования по своей сути близки к ВЭЗ и ДЭЗ, но в отличие от них появляются возможности: бесконтактных

³ К этим способам можно отнести, рассмотренные в предыдущих главах метод ВЭЗ и магнитотеллурические зондирования.

измерений; зондирования сквозь непроводящие экраны; определения ρ без измерения силы тока в генераторном магнитном диполе (по величине отношений компонент поля $|H_z/H_r|$, $|Z|=|E_\phi|/|H_r|$).

Поисковые возможности ЧЗ и ЗС (методов, работающих в дальней зоне источников соответственно гармонического и нестационарного поля) приблизительно одинаковы. Однако ЧЗ более помехоустойчив, а ЗС зачастую более глубинен (особенно при использовании мощных и сверхмощных генераторных устройств).

Очень удобным (благодаря своей технологичности, избирательности и наглядности получаемых результатов) для электроразведки на средних глубинах (1–3 км) оказался ЗСБ, работающий в ближней зоне источника поля – нестационарного магнитного диполя.

5.1. Частотное зондирование

Частотное электромагнитное зондирование (ЧЭЗ, ЧЗ) представляет собой метод электроразведки переменным гармонически меняющимся полем, предназначенный для изучения геологических разрезов с пологими поверхностями раздела. Реже этот метод применяют для изучения разрезов с локальными (главным образом рудными) объектами.

Источником переменного электромагнитного поля служит гармонически меняющийся электрический или магнитный диполь.

Глубина проникновения электромагнитного поля в землю определяется его частотой и растет с уменьшением частоты. Вследствие этого поле диполя, момент которого меняется с большой частотой, зависит от строения только верхней части геоэлектрического разреза. По мере снижения частоты глубина проникновения растет, и на характер поля, наблюдаемого на поверхности земли, оказывают влияние более глубокие горизонты разреза. Таким образом, снижение частоты приводит к тому же эффекту, что и увеличение расстояния между источником и точкой наблюдения при зондированиях на постоянном токе.

Частотные зондирования могут применяться как для глубинных (первые километры) исследований, так и для изучения разрезов на сравнительно небольшую (до первых сотен метров) глубину. В первом случае зондирования выполняются в диапазоне частот 10^{-1} – 10^3 Гц (низкочастотные ЧЗ), во втором случае – в диапазоне 10^3 – 10^6 Гц (высокочастотные ЧЗ).

В сущности, частотные зондирования можно выполнять в поле любого электрического или магнитного диполей, измеряя при этом электрическую или магнитную компоненту поля, соотношение этих компонент, элементы эллипса поляризации и т. д.

Практически выбор типа источника поля и его информационных параметров определяется характером решаемых геологических задач. При глубинных структурных исследованиях обычно выполняются низкочастотные зондирования в поле переменного электрического диполя. Горизонтальная электрическая компонента E_x , параллельная оси диполя, и вер-

тикальная компонента магнитного поля H_z измеряются в экваториальной плоскости питающего диполя AB (рис. 5.1.1.а) или в точках, для которых $0 < \theta < 30^\circ$ (рис. 5.1.1.б).

Компонента E_x измеряется при помощи заземленной линии, параллельной AB . Датчиком компоненты B_z служит горизонтально расположенная на земле многовитковая рамка. Разнос установки (расстояние между центрами питающего и измерительных диполей) должен в 2–5 раз превышать глубину до опорного горизонта. При выборе размеров питающего и измерительных диполей необходимо учитывать два противоречивых требования: с одной стороны, размеры диполей и соответственно их моменты должны быть достаточно большими, чтобы обеспечить уверенно измеряемые сигналы на входе измерительной аппаратуры; с другой стороны, эти размеры должны быть существенно меньше расстояния между центрами питающей и измерительной линий, чтобы обеспечивать их дипольность.

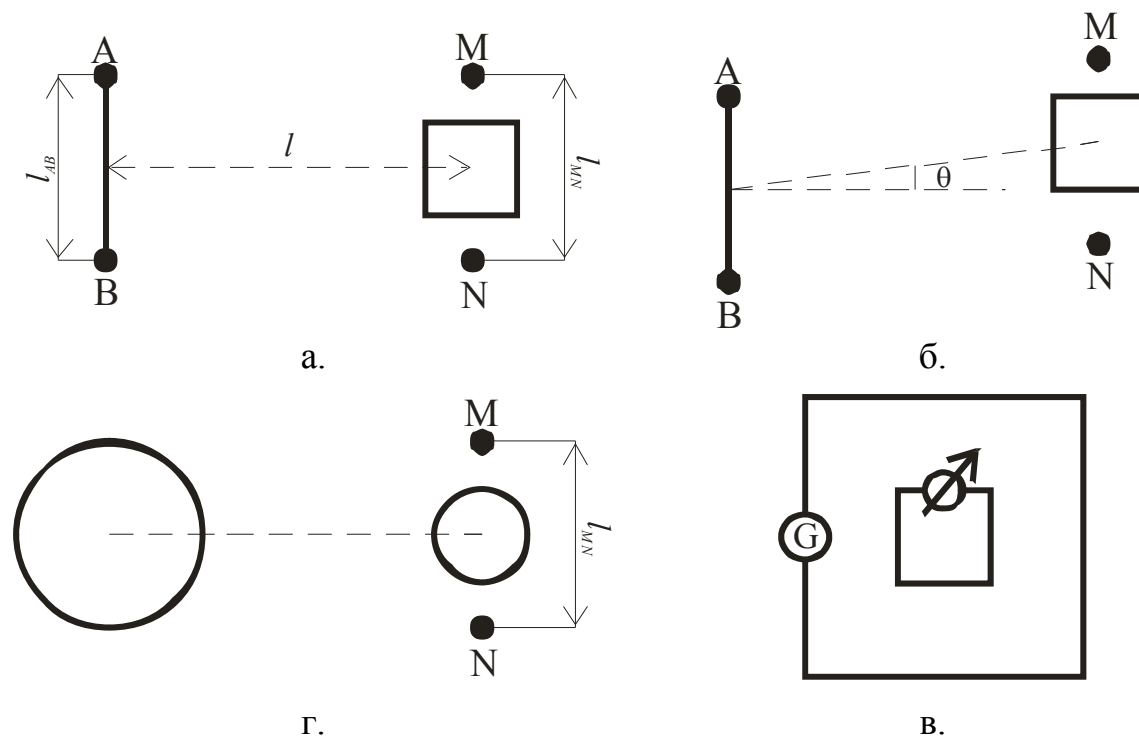


Рис. 5.1.1. установки для электромагнитных зондирований:

а – дипольно-экваториальная, б – дипольно-экваториальная с $\theta \neq 0$, в – в поле вертикального магнитного диполя, г – петля в петле.

По результатам измерений на каждой из частот определяются кажущееся сопротивление ρ_ω и фаза φ_ω :

$$|\rho_\omega| = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (5.1.1.)$$

$$\varphi_\omega = \varphi_{раб} - \varphi_{оп}, \quad (5.1.2.)$$

Здесь K – коэффициент установки; ΔU — э.д.с. в датчиках электрического или магнитного поля, мкВ; I – ток в питающем диполе; $\varphi_{раб}$ и $\varphi_{оп}$ – фазы сигнала в датчике поля и опорного сигнала.

При измерении E_x

$$K_{E_x} = \frac{2\pi l^3 \cdot 10^{-6}}{l_{AB} l_{MN} (3\cos^2 \theta - 2)}. \quad (5.1.3.)$$

При измерении B_z

$$K_{E_x} = \frac{2\pi l^4 \cdot 10^{-6}}{3l_{AB} nS \sin \theta}. \quad (5.1.4.)$$

В этих выражениях помимо принятых выше обозначений S – площадь измерительной рамки, n – число витков в ней. Предполагается, что ΔU измеряется в мкВ, ток в диполе — в А.

Результаты зондирования изображаются в виде графиков ЧЗ. По оси ординат при этом откладывается ρ_{ω} , по оси абсцисс \sqrt{T} . Графики строятся на стандартных билогарифмических бланках с модулем 6,25 см

Интерпретация результатов зондирования в поле гармонически меняющихся диполей, так же как и интерпретация обычных ВЭЗ, может носить качественный и количественный характер. В первом случае по данным совокупности ЧЗ строятся разрезы ρ_{ω} , карты изолиний продольной проводимости надпорной толщи и т. д. При изучении горизонтально-слоистых или близких к ним геоэлектрических разрезов применяют количественные приемы интерпретации, основанные на сравнении полевых и теоретических кривых. Такая интерпретация осуществляется с помощью компьютера.

5.2. Зондирование становлением электромагнитного поля

Отличительная особенность зондирования становлением поля ЗС заключается в том, что в процессе зондирования изучают нестационарное электромагнитное поле электрического или магнитного диполей, возбуждаемое в земле при ступенчатом изменении первичного поля этих диполей.

Если на поверхности земли расположен диполь, питаемый постоянным током, то в его поле оказываются проводящие горные породы, слагающие геологический разрез. При ступенчатом выключении или включении тока в питающем диполе его первичные магнитное и электрическое поля также ступенчато изменяются от какого-то конечного значения до нуля либо наоборот. Изменение первичного поля приводит к индуктивному возбуждению вторичных токов в горных породах. В начальный момент времени эти токи распределяются по поверхности проводящих областей разреза таким образом, чтобы сохранилось постоянным поле внутри этих областей. В последующие моменты времени вторичные токи перераспределяются в пространстве, проникая вглубь, и затухают вследствие тепловых потерь. Соответственно характер зависимости электрического и магнитного вторичных полей от времени на ранних «стадиях переходного процесса определяется строением верхних горизонтов геоэлектрического разреза, а на поздних стадиях – строением глубинной части разреза. Таким

образом, изучение зависимости нестационарного поля от времени позволяет составить представление об изменении геологического разреза в вертикальном направлении, т. е. является электрическим зондированием [Якубовский, 1988].

При зондировании становлением поля нестационарное поле изучают после выключения тока в питающем диполе, т. е. при отсутствии первичного поля. Это весьма облегчает процесс зондирования, поскольку измеряется только информативная часть поля.

Зондирования становлением поля можно выполнять различными установками. При глубинных структурных исследованиях обычно применяют зондирования в поле электрического диполя с измерением нестационарного поля E_x и B_z (см. рис. 5.1.1.а), Реже применяется установка из двух соосных незаземленных петель, внешняя из которых служит для индуктивного возбуждения нестационарного поля, а внутренняя — для измерения вертикальной магнитной компоненты этого поля (см. рис. 5.1.1.г).. В зависимости от расстояния между источником поля и точкой его измерения различают две основные модификации зондирования становлением — зондирование в ближней (ЗСБЗ) в дальней (ЗСДЗ) зонах.

При зондировании в ближней зоне разнос между питающим диполем и точкой измерения не превышает двух-, трехкратную глубину до опорного электрического горизонта. Иногда применяют установки, в которых питающие и измерительные диполи пространственно совмещены. При зондировании в дальней зоне разнос должен в 3–10 раз превышать глубину до опорного горизонта.

Несмотря на малый разнос установки, ЗСБЗ обеспечивает глубинность исследований, соизмеримую с глубиной ЗСДЗ. Физической основой этого на первый взгляд парадоксального обстоятельства является то, что скорость затухания токов в земле, индуктивно возбужденных в непосредственной близости от источника, значительно превышает скорость затухания токов; в удаленных от источника областях. Это позволяет соответствующим выбором времени регистрации нестационарного поля уменьшить влияние на измеренный нестационарный сигнал поверхностной части геологического разреза и, таким образом повысить глубинность зондирования.

По результатам регистрации определяют величину сигнала $\Delta U(t)$ на выходе датчиков поля для различных моментов времени по всем пригодным для обработки импульсам. По усредненной величине подсчитывают кажущееся сопротивление ρ_τ .

При зондировании в ближней зоне

$$\rho_\tau = K \left[\frac{I}{\Delta U(t)} \right]^{2/3} t^{-5/3}, \quad (5.2.1.)$$

где I — ток в питающем диполе; t — время, прошедшее с момента выключения тока в питающем диполе; K — коэффициент установки, зависящий от типа установки.

Если источником поля служит заземленная на концах линия AB и при этом измеряется вертикальная компонента магнитного поля B_z , то

$$K = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{r_{AB} s n \mu_0 r}{5} \right)^{2/3}, \quad (5.2.2.)$$

где n – число витков; s – площадь каждого витка приемной рамки; r_{AB} – длина питающего диполя; r – разнос установки; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

При зондировании в дальней зоне

$$\rho_\tau = K \frac{\Delta U(t)}{I}, \quad (5.2.3.)$$

Значения коэффициентов установки для этой модификации 3G совпадают с таковыми для частотного зондирования.

При построении полевых ЗС по оси ординат откладывают ρ_τ , а по оси абсцисс $\sqrt{2\pi t}$. Кривую строят в двойном логарифмическом масштабе на стандартных бланках. Пример кривой ρ_τ приведен на рис. 5.2.1.

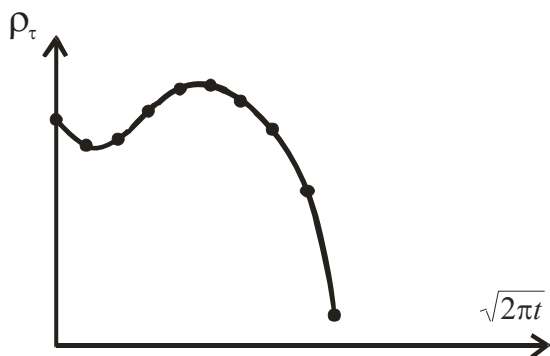


Рис. 5.2.1. Кривая ρ_τ .

Глава 6. Индуктивные методы

К индуктивным относятся такие методы электроразведки в которых электромагнитное поле создают с помощью незаземленных контуров, обтекаемых переменным током. Контурами могут служить рамки малых размеров, большие прямоугольные петли, очень длинные кабели и др. Электромагнитное поле этих источников (обычно его магнитная компонента) исследуется на земной поверхности, в скважинах или над поверхностью земли (аэроэлектроразведка).

Другой особенностью индуктивных методов является то, что расстояние между источником поля и точками его наблюдения выбирают таким, чтобы оно было меньше длины волны, т. е. поле исследуется в ближней (индукционной) зоне источника поля.

6.1. Низкочастотные индуктивные методы в гармонических полях

Среди *низкочастотных индуктивных методов (НЧИМ)* наиболее часто применяют *метод незаземленной петли (НП, МНП)*, в котором источником возбуждения служит прямоугольная петля больших размеров, внутри которой осуществляются измерения магнитных компонент электромагнитного поля (обычно вертикальной компоненты магнитного поля H_z).

В средней части петли, где возбуждающее (первичное) магнитное поле в достаточной степени однородно, разбивается сеть профилей вкрест предполагаемого простирания объектов исследования, вдоль которых производятся измерения магнитной компоненты суммарного (H_c) магнитного поля (рис. 6.1.1), являющегося векторной суммой первичного магнитного поля (поля петли) вторичного магнитного поля (поля локального объекта H_{sm}) или отношение амплитуд и разность $\frac{H_z}{H_{z_2}}$ и разность вертикальной компоненты магнитного поля $\Delta\phi$.

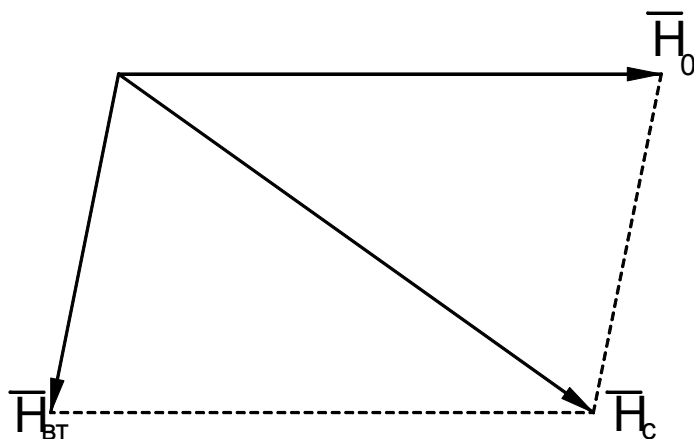


Рис. 6.1.1. Суммарное магнитное поле H_c

В результатах метода незаземленной петли выделяют два типа аномалий: от проводящих тел и от проводящих магнитных тел.

Когда первичное поле петли воздействует на проводящее немагнитное тело, то в нем возникает электрический ток, который в свою очередь создает магнитное поле, направленное в противоположную сторону, относительно первичного. В результате суммарное поле получается меньше по сравнению с первичным, так возникают аномалии проводимости (рис. 6.1.2.а).

Если тело обладает достаточно большой магнитной восприимчивостью по сравнению с вмещающими породами, то под действием первичного поля петли оно намагничивается. В результате возникает вторичное по-

ле, направленное в ту же сторону, что и первичное поле, поэтому суммарное поле будет больше, чем первичное (рис. 6.1.2.б). При дальнейшем увеличении частоты поле от токов проводимости превысит поле намагниченности, то есть аномалия получит форму, приведенную на рис. 6.1.2.а.

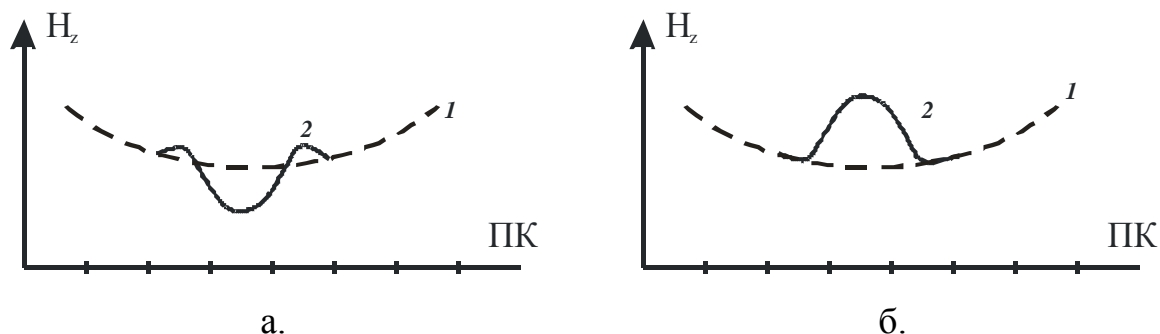


Рис. 6.1.2. Нормальное (1) и аномальное (2) поле петли для: а – проводящего немагнитного объекта, б – проводящего магнитного объекта.

Методика и техника полевых работ

Площадная съемка в методе НП при поисках проводящих объектов проводится на достаточно высокой частоте (порядка 1000 Гц), а при поисках магнитных тел – на наиболее низкой частоте (первые десятки герц). Детализационные работы проводятся на нескольких частотах в диапазоне 20–3000 Гц с целью получения частотной и амплитудно-фазовой характеристик по сгущенной сети наблюдений исследуемого объекта.

Съемочный планшет располагается внутри петли в пределах достаточно однородного нормального поля. Расстояние от крайней на профиле точки наблюдения до ближайшей стороны петли должно быть не меньше 200 м. Максимальные расстояния от источника поля до точки наблюдения при измерениях вне петли определяются мощностью генераторной группы и чувствительностью измерительной аппаратуры (достигают 1–3 км). Профили располагаются вкрест преимущественного простирания горных пород. При поисках крутопадающих маломощных рудных тел допускается съемка вне петли по профилям, ориентированным перпендикулярно либо параллельно стороне петли. В последнем случае длинную сторону петли располагают вкрест предполагаемого простирания изучаемых объектов.

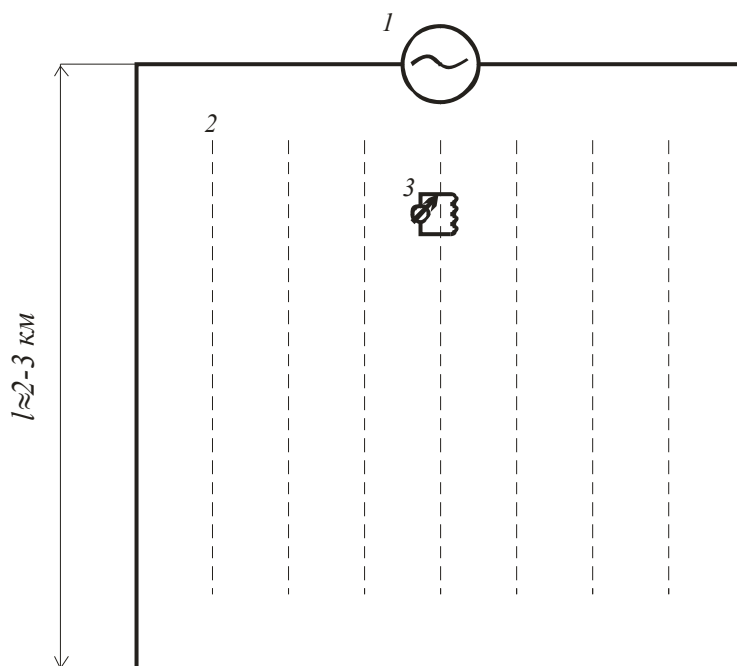


Рис. 6.1.3. Схема проведения работ методом незаземленной петли
1 – генератор, 2 – линии профилей, 3 – магнитоиндукционный датчик (МИД).

Интерпретация в методе незаземленной петли

Интерпретация результатов полевых наблюдений в низкочастотной индуктивной электроразведке гармоническими полями заключается в определении параметра объекта $p = \sigma \mu \omega a^2$, (где σ – проводимость объекта; μ – его магнитная проницаемость; ω – круговая частота; a^2 – квадрат характерного размера (допустим, радиуса r), а также в оценке его размеров, глубины залегания, проводимости и для магнитных объектов его магнитной проницаемости и соотношения между остаточной и индуктивной намагниченностью объекта $Q = \mathbf{J}_n / \mathbf{J}_i$

В зависимости от того, обладает или нет объект исследования повышенной магнитной проницаемостью по отношению к вмещающим породам, способы интерпретаций несколько различаются. Оценить, является ли тело магнитным по отношению к вмещающим породам, можно на основании сопоставления аномалий по амплитуде и фазе на нескольких частотах. Аномалии амплитуды над проводящими объектами характеризуются увеличением их интенсивности с ростом частоты. Аномалии над высокомагнитными проводящими объектами характеризуются уменьшением величины аномалии амплитуды H_z с ростом частоты, изменением знака аномалии на определенной частоте и последующим достижением асимптотических значений на достаточно высоких частотах.

При интерпретации строят частотные характеристики для искомым объектов. Набор теоретических амплитудно-частотных характеристик представлен на рис. 6.1.4.

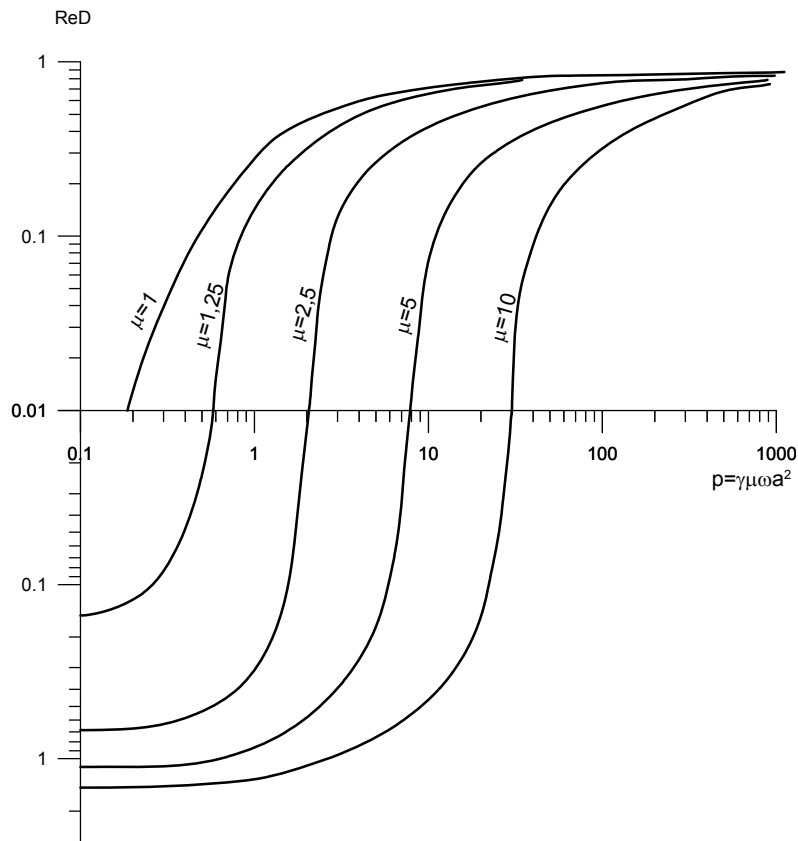


Рис. 6.1.4. Палетка для шара в однородном полупространстве

Геологические задачи метода

Метод НП применяют главным образом для поисков руд низкого удельного сопротивления либо высокой магнитной проницаемости, а также для изучения геологической природы аномалий, обнаруженных другими геофизическими методами.

Физические основы метода позволяют его применять в сложных условиях, таких как поиски проводящих магнитных руд под траппами, например, для поисков железных руд или кимберлитовых магнитных тела.

Отличительной особенностью метода является достаточно большой объем информации об объекте исследования (электропроводность, магнитная проницаемость, размеры, глубина залегания, а при сопоставлении с данными магниторазведки – сведения об остаточной намагниченности).

6.2. Метод переходных процессов

Сущность метода переходных процессов заключается в изучении неустановившегося магнитного поля вихревых токов, которые возникают во всех проводящих электрический ток геологических образованиях при ступенчатом изменении тока в контуре, расположенном на поверхности земли либо в воздухе. Скорость затухания вихревых токов определяется тепловыми потерями в проводнике и его размерами. Чем крупнее проводящее

тело и больше его электропроводность, тем дольше длится переходный процесс. Поэтому по крутизне переходной характеристики можно судить о качестве проводника (его размерах и электропроводности). С другой стороны, можно подобрать такой промежуток времени для регистрации переходного процесса, когда существует вторичное поле, вызванное в основном крупными, хорошо проводящими рудными телами, а поле относительно слабых проводников (поверхностные образования, тектонические зоны и т. п.) уже исчезло.

Выделяют несколько модификаций метода переходных процессов: аэро МПП (АМПП), профилирование (ПМПП), зондирование (ЗМПП), скважинный вариант (СМПП). Наземный вариант включает две модификации — с совмещенными петлями, или однопетлевою (МППО), и рамочно-петлевою (МППР). В модификации с совмещенными петлями для возбуждения и приема используются самостоятельные пространственно совмещенные петли, обычно квадратные. В случае, когда для приема и возбуждения поля используется одна и та же петля, модификация называется однопетлевой.

Методика полевых работ МПП

Поиски месторождений хорошо проводящих руд методом переходных процессов включают в себя два основных этапа: опоскование площадей и детализация аномалий. Кроме того, на стадии разведочных работ используются скважинные исследования. Последние могут применяться в сочетании с бурением, и для поисковых целей на глубинах недоступных наземным методам.

Поисковые работы проводятся однопетлевой (или с совмещенными петлями) модификацией МПП по сети профилей, расположенных вкрест предполагаемого простирания искомым объектов. Шаг наблюдений по профилю и расстояние между профилями выбираются равными стороне петли (т. е. петли располагаются вплотную одна к другой без пропусков и перекрытий). Петли раскладываются по заранее подготовленной, закрепленной на местности сети наблюдений.

Провода, применяемые для приемных и генераторных петель, должны иметь хорошую изоляцию, а для генераторных петель — и низкое сопротивление. При работах с одной генераторно-приемной петлей необходимо применять только медные провода (без стальных жил).

На выделенных аномальных участках проводятся детализационные работы с использованием модификаций МППР (или МППО). Детализация с помощью модификации МППР производится по профилям, расположенным вкрест простирания аномалии (аномальной зоны). Генераторная петля располагается так, чтобы детализируемая аномальная зона находилась внутри петли в ее центральной части. Наблюдения обычно ведутся по сети 50×20 либо 100×50 м с необходимым сгущением в наиболее интересных участках профиля.

Результаты поисковой съемки представляются в виде графиков отношения ЭДС к силе тока (U/I) в генераторном контуре вдоль профиля наблюдений на всех временах задержки и в виде планов изолиний тех же значений для наиболее характерных моментов времени. Для отдельных точек профиля строятся переходные характеристики, которые являются источником информации о физических характеристиках объекта.

Применение МПП

Работа методом МПП осуществляется, в основном, для поиска крупных рудных тел. При помощи МПП решают задачи геологического картирования и поиск нефтегазовых месторождений. МПП применяют для поиска сульфидных руд с массивной и прожилково-вкрапленной текстурой. Метод может применяться также для поисков каменных углей, графита, шунгита.

Глава 7. Радиоволновые методы

Для радиоволновых методов электроразведки, характеризующихся малой длиной волны и относительной удаленностью источников поля, существует свой круг геологических задач, где они практически незаменимы. Шахтное и скважинное радиопросвечивание позволяет выявлять и оконтуривать проводящие рудные тела (или объекты) между горными выработками на удалении до первых сотен метров и широко применяется при разведке месторождений. Наземные съемки РадиоКИП и СДВР (сверхдлинноволновой РадиоКПИ) достаточно информативны при неглубинном геокартировании. Другие радиоволновые методы (радиоволновое зондирование, радиолокационный метод, более известный как георадар и др.) зачастую весьма эффективны в гидрогеологии, гляциологии, археологии и т.п., то есть там, где не требуется большая глубинность исследований или имеются высокоомные разрезы.

Радиоволновые методы разведки основываются на изучении процессов распространения в горных породах электромагнитных волн, частоты которых изменяются от десятых долей до десятков МГц.

Электромагнитное поле, в значительной мере определяется электрическими свойствами среды. За счет влияния диэлектрической постоянной среды и токов смещения электромагнитные поля радиоволновых частот характеризуются некоторыми особенностями, отличающими их от электромагнитных полей низких и звуковых частот.

Поглощаемая средой энергия расходуется на индицирование вторичных токов, плотность которых прямо зависит от проводимости пород. Таким образом, распространение электромагнитной энергии в пластах горных пород сопровождается явлениями поглощения и индукции, интенсивность которых возрастает как с увеличением частоты, так и с ростом проводимости среды. Кроме того, при распространении радиоволн в неодно-

родной среде возникают такие явления, как отражение, преломление, дифракция волн, подчиняющиеся законам геометрической оптики. Все это вместе взятое и определяет возможность применения радиоволн для геологического картирования, поисков и разведки полезных ископаемых.

На наблюдении поглощения и связанного с ним ослабления поля основывается метод радиоволнового просвечивания. В методе радиоволнового просвечивания исследуется электромагнитное поле автономного передатчика, и наблюдения проводятся на расстояниях r , соизмеримых с длиной волны (в породе), т. е. в промежуточной зоне

При проходке разведочных и эксплуатационных горных выработок и скважин часть рудных тел и иных объектов поисков или разведки оказывается в пространстве между горными выработками и скважинами и таким образом остается необнаруженной. Используя различие коэффициентов поглощения вмещающих пород и искомым объектов, можно «просветить» электромагнитными волнами исследуемое пространство и по поглощению энергии передатчика установить наличие или отсутствие рудных тел и других геологических образований в толще окружающих отложений.

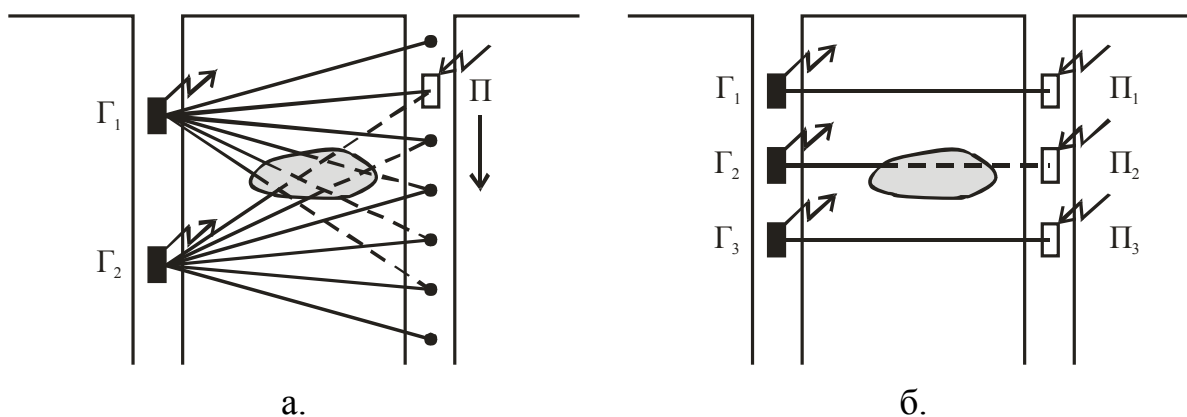


Рис. 7.1. Системы наблюдений при работах методом РВП: а – веерная, б – синхронная.

С помощью РВМ решаются следующие задачи: обнаружение и локализация тел-экранов между скважинами и выработками; прослеживание, оконтуривание, увязка рудных подсечений, а также выявление пережимов (окон) в телах экранов; оценка размеров тел-экранов и расстояний до их кромок; установление безрудности блоков пород между скважинами и горными выработками. В модификации высокочастотной электромагнитной корреляции (ВЭМК) РВМ применяются при изучении рудных тел, удельная электропроводность которых меньше удельной электропроводности вмещающих пород.

Поисково-разведочные задачи решаются с помощью РВМ на рудных месторождениях различных типов – сульфидных магнетитовых, кварцевожильных и др., а также на месторождениях пьезокварца, алмазов, урана и ряда других полезных ископаемых. Кроме того, РВМ применяются при решении таких геологических задач, как поиски обводненных зон, тектонических нарушений, карстовых полостей и т.п.

Справочные таблицы

Удельные электрические сопротивления пород
[Вахромеев, Зинченко, 2006], [Дортман, 1976]

Порода	ρ, Ом·м	Порода	ρ, Ом·м
1. Сиенит	10 ³ –10 ⁴	11. Известняк	10 ² –10 ³
2. Граносиенит	10 ³	12. Песчаник	10–10 ³
3. Гранит	10 ³ –10 ⁴	13. Глины	1–50
4. Диорит	10 ³	14. Ископаемые угли:	
5. Габбро	10 ² –10 ³	бурые	10–10 ³
6. Амфиболит	10 ² –10 ⁴	каменные	10 ² –10 ⁴
7. Базальт	10 ³ –10 ⁵	антрацит	10 ² –10 ²
8. Гнейс	10 ³ –10 ⁵	15. Жидкости:	
9. Глинистый сланец	10 ² –10 ³	нефть	10 ¹² –10 ¹⁴
10. Мрамор	10 ³ –10 ⁸	речные воды	10–10 ³
		морские воды	0,15–1,5

Последовательность разносов MN и коэффициенты установок ВЭЗ

$$k = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN}$$

№ замера	AB/2, м	MN, м	k, м	№ замера	AB/2, м	MN, м	k, м
1	3	2	12,6	18	325	150	2093,3
2	4,5	2	30,2	19	500	150	5115,6
3	6	2	55,0	20	750	150	11657,3
4	9	2	125,6	21	750	500	3140,0
5	15	2	351,7	22	1000	150	20815,6
6	15	10	62,8	23	1000	500	5887,5
7	25	2	979,7	24	1500	500	13737,5
8	25	10	188,4	25	2000	500	24727,5
9	40	10	494,6	26	2000	1000	11775,0
10	65	10	1318,8	27	3000	500	56127,5
11	65	40	300,3	28	3000	1000	27475,0
12	100	10	3132,2	29	4500	1000	62800,0
13	100	40	753,6	30	4500	2000	30222,5
14	150	40	1734,9	31	6000	1000	112255,0
15	225	40	3942,7	32	6000	2000	54950,0
16	225	150	942,0	33	8000	2000	98910,0
17	325	40	8260,2	34	10000	2000	155430,0

Словарь сокращений принятых в электроразведке

БЗ	Ближняя зона
ВП	Метод вызванной поляризации
ВЭЗ	Вертикальное электрическое зондирование
ДЗ	Дальняя зона
ЕП	Метод естественного поля
ЗС	Зондирование становлением поля
ЗСБ, ЗСБЗ	Зондирование становлением поля в ближней зоне
ЗСДЗ	Зондирование становлением поля в дальней зоне
МЗТ	Метод заряженного тела
МИД	Магнитоиндукционный датчик
МПП	Метод переходных процессов
МТЗ	Магнитотеллурическое зондирование
МТП	Магнитотеллурическое профилирование
НП	Незаземленная петля
НЧИМ	Низкочастотные индуктивные методы электроразведки
РадиоКИП	Метод радиокомпарации и пеленгации
СДВР	Сверхдлинноволновой РадиоКПИ
РВЗ	Радиоволновое зондирование
РВМ	Радиоволновые методы
РВП	Радиоволновое просвечивание
СЭП	Симметричное электропрофилирование
УЭС	Удельное электрическое сопротивление
ЧЗ	См. ЧЭЗ
ЧЭЗ	Частотное электромагнитное зондирование
ЭДС	Электродвижущая сила (разность потенциалов, электрическое напряжение)
ЭЗ	Электрическое зондирование
ЭП	Электрическое профилирование (Электропрофилирование)

Обозначения в электроразведке

Обозначение	Пояснение	Размерность	С/В*
E	Напряженность электрического поля	В/м	В
H	Напряженность магнитного поля	А/м	В
B	Магнитная индукция	Тл	В
E_x, E_y, E_z	Компоненты электрического поля	В/м	С
H_x, H_y, H_z	Компоненты магнитного поля	А/м	
ρ	Удельное электрическое сопротивление	Ом·м	С
ρ_k	Кажущееся удельное электрическое сопротивление (кажущееся сопротивление)	Ом·м	С
ρ_ω	Параметр аналогичный кажущемуся удельному электрическому сопротивлению при частотных зондированиях.	Ом·м	С
ρ_T	Параметр аналогичный кажущемуся удельному электрическому сопротивлению в магнитотеллурических методах	Ом·м	С
ρ_τ	Параметр аналогичный кажущемуся удельному электрическому сопротивлению в методе зондирования становлением.	Ом·м	С
Z	импеданс	Ом	С
γ	Удельная проводимость	См/м	С
η	Поляризуемость	%	С
ϵ_0	Электрическая постоянная (абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума) $\epsilon_0=10^{-9}/36\pi$ Ф/м	Ф/м	С
ϵ_a	Абсолютная диэлектрическая проницаемость	Ф/м	С
$\epsilon_{отн}$	Относительная диэлектрическая проницаемость	-	С
μ_0	Магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума) $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м	Гн/м	С
μ_a	Абсолютная магнитная проницаемость	Гн/м	С
$\mu_{отн}$	Относительная магнитная проницаемость	-	
T	Период	с	С
f	Частота	Гц	С
λ	Длина волны	м	С
ω	Круговая частота	рад/с	С
S	Продольная проводимость	См	С
T	Поперечное сопротивление	Ом·м ²	С

*Скалярная или векторная величина.

Список литературы

1. Бобровников Л.З. Электроника. Спб.: Питер, 2004.
2. Доброхотова И.А. Практикум по интерпретации результатов полевых наблюдений в методах электроразведки. М.: 1985.
3. Доброхотова И.А., Ренард И.В.. Электроразведка. Программа, методические указания и контрольное задание для студентов-заочников специальности 08.02, М.: 1994.
4. Ерофеев Л.Я., Вахромеев Г.С., Зинченко В.С., Номоконова Г.Г. Физика горных пород. Томск, ТПУ, 2006.
5. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984 г.
6. Физические свойства горных породы и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. Под редакцией Дортман Н.Д. М.: Недра, 1976 .
7. Хмелевской В.К.. Основной курс электроразведки. Часть 1. Электроразведка постоянным током. М.: МГУ, 1970.
8. Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л.. Электроразведка. 5-е издание переработанное и дополненное. М.: Недра, 1988 г.
9. Якубовский Ю.В., Ренард И.В., Электроразведка. М.: Недра, 1991.

