

Ю. В. ЯКУБОВСКИЙ, А. А. ЛЯХОВ

ЭЛЕКТРО-
РАЗВЕДКА

В. В. ЯКУБОВСКИЙ Л. Л. ЛЯХОВ

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Издание третье, переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для геологоразведочных техникумов

3146



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1974



Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. Издание третье, переработанное и дополненное. М., «Недра», 1974, 376 с.

В учебнике изложены теоретические основы методов электроразведки, способы проведения полевых наблюдений, обработки и интерпретации данных, получаемых при работе различными модификациями электроразведочных методов. Рассмотрены вопросы геологического истолкования результатов наблюдений.

Электроразведочная аппаратура описана кратко, в той мере, которая необходима для понимания методики и техники проведения полевых работ и выполнения измерений.

В третье издание учебника включены материалы по новым модификациям электроразведки — площадному электрическому картированию, скважинным вариантам методов естественных потенциалов и заряда, новым способам обработки и интерпретации результатов наблюдений магнитотеллурическими методами и пр.

Книга является учебником для учащихся техникумов по курсу электроразведки; она может быть полезна техникам-электроразведчикам и студентам геологоразведочных вузов.

Таблиц 8, иллюстраций 234, список литературы — 16 назв.

Рецензент: канд. геол.-минералог. наук В. В. Бродовой.

Я $\frac{0295-43}{043 (01)-74}$ 133-74

© Издательство «Недра», 1974

Юрий Владимирович Якубовский,

Лев Львович Ляхов

Электроразведка

Издание третье, переработанное и дополненное

Редактор издательства Н. Г. Богачева

Технические редакторы Л. Д. Агапонова, В. В. Соколова

Переплет художника М. И. Гозенпунт.

Корректор К. И. Савенкова


Сдано в набор 6/IX 1973 г. Подписано в печать 4/I 1974 г. Т-03403. Формат 60 × 90^{1/16}.

Бумага № 2. Печ. л. 23,5. Уч.-изд. л. 24,81. Тираж 7500 экз.

Заказ № 512/4111-3. Цена 1 р. 03 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 6 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91.



ВВЕДЕНИЕ

Электрическая разведка, или электроразведка, является одним из основных геофизических методов изучения геологического строения верхних частей земной коры.

Горные породы в зависимости от их состава, структуры и условий залегания обладают различными электрическими свойствами — удельным сопротивлением ρ , диэлектрической проницаемостью ϵ и др. Таким образом, реальный геологический разрез можно рассматривать как часть пространства, заполненную средами с различными электрическими свойствами. Эти свойства, а также геометрические параметры сред — мощность, глубина залегания, угол падения пород и др. — определяют геологический разрез, характеризующий геологическое строение района.

Поверхности раздела в геоэлектрическом разрезе не всегда совпадают с геологическими границами, устанавливаемыми по литологическим, генетическим и другим геологическим признакам. Иногда геологически однородная толща пород распадается на несколько геоэлектрических горизонтов и, наоборот, несколько геологических образований объединяются в один геоэлектрический горизонт.

Непосредственной задачей, решаемой при помощи электроразведки, является определение геоэлектрического разреза исследуемого района. Имея сведения о геоэлектрическом разрезе, можно перейти к решению основной задачи — построению геологического разреза. Для этого необходимо знать электрические свойства горных пород и их связь с различными геологическими факторами: литологическим составом, условиями залегания, возрастом пород и т. д.

Способ изучения геоэлектрического разреза, принятый в электроразведке, заключается в том, что на дневной поверхности, в горных выработках и буровых скважинах наблюдают естественные или искусственно созданные электромагнитные поля. Характеризующие эти поля величины — напряженность и потенциал — зависят

от строения геоэлектрического разреза. Изучив поле в доступных для исследования точках, можно с той или иной степенью точности составить представление о строении геоэлектрического разреза.

Введем понятие о прямой и обратной задачах электроразведки.

Прямая задача электроразведки состоит в определении электромагнитного поля по заданным источникам поля и параметрам геоэлектрического разреза. Анализ решения прямой задачи позволяет предвидеть результаты наблюдения поля в различных геологических условиях и на этом основании выбирать целесообразные способы исследования поля, методику обработки и изображения результатов и т. п.

Обратная задача электроразведки заключается в определении геоэлектрического разреза по наблюдаемому электромагнитному полю. Этот процесс принято называть интерпретацией результатов полевых наблюдений. Переход от наблюдаемого поля к геоэлектрическому разрезу осложняется некоторой неоднозначностью решения обратной задачи. Данному электромагнитному полю, полученному в результате наблюдений с практически достижимой точностью, могут соответствовать геоэлектрические разрезы с различными значениями параметров. Из этих разрезов интерпретатор должен выбрать один, соответствующий истинному геологическому строению исследуемого района.

При решении обратной задачи приходится использовать предварительные данные об электрических свойствах горных пород, слагающих исследуемую площадь, данные о геологическом строении ее, результаты исследований другими геофизическими методами и т. п. Все это позволяет уменьшить степень неоднозначности решения обратной задачи, т. е. повысить достоверность результатов интерпретации.

Электроразведку применяют при весьма разнообразных геологических исследованиях — поисках месторождений полезных ископаемых, геологическом картировании, инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях и т. п. При этом используют весьма разнообразные и многочисленные электроразведочные методы и их модификации.

Многообразие методов электроразведки определяется прежде всего тем, что электромагнитное поле в Земле может создаваться и исследоваться различными способами. Существуют два основных способа возбуждения электромагнитного поля в земле: гальванический и индуктивный. Гальванический способ характеризуется тем, что два заземления, погруженные в землю, присоединяются к полюсам какого-либо источника постоянного или переменного тока (батарея, генератор и др.). Разность потенциалов между двумя заземлениями обуславливает возникновение в земле электрического поля.

При индуктивном способе источником поля является

незаземленный контур, питаемый переменным током от какого-либо генератора — лампового, машинного и др. Переменное электромагнитное поле тока, текущего в незаземленном контуре, является предметом полевых измерений.

Помимо названных двух основных способов, применяется комбинированный способ возбуждения поля, представляющий собой сочетание гальванического и индуктивного. При этом исследуемое поле состоит из двух частей; одна из этих частей создается заземлениями, а вторая — током, текущим в проводах, соединяющих генератор с заземлениями.

Во всех перечисленных выше способах используются разнообразные установки, отличающиеся одна от другой конструкцией и взаимным положением заземлений, конфигурацией и размерами незаземленных контуров и т. п.

Способы изучения электромагнитных полей, применяемые в электроразведке, также весьма разнообразны. Постоянные электромагнитные поля обычно исследуют путем измерения разностей потенциалов между различным образом выбранными точками земли. В эти точки помещают заземления, которые подключают к прибору, измеряющему разность потенциалов. Принципиально не исключена возможность исследования постоянного электромагнитного поля путем измерения его магнитной составляющей, однако практически эта возможность используется редко.

В методах электроразведки, использующих переменные электромагнитные поля, измеряют как магнитную, так и электрическую составляющую поля, а в некоторых методах — соотношение между ними. Для измерения электрического поля так же, как и в методах постоянного поля, применяют заземленные измерительные линии. Для измерения магнитной составляющей обычно используют многовитковые индукционные рамки. Известно, что э. д. с., наведенная переменным магнитным полем в такой рамке, пропорциональна ее эффективной площади, компоненте поля, перпендикулярной к плоскости витков, а также скорости изменения поля со временем. Эту э. д. с. измеряют специальными приборами, подключаемыми к рамке. Переменные электромагнитные поля, меняющиеся по закону синуса или косинуса, характеризуются амплитудой и фазой электрической и магнитной составляющих, а также ориентацией вектора поля в пространстве. Все эти величины зависят от характера геоэлектрического разреза, поэтому их измерение дает информацию об этом разрезе. В случае нестационарных переменных полей можно измерять мгновенные значения поля в заданный момент времени и скорость их изменения со временем. В зависимости от геологических условий и типа решаемых задач частоту исследуемого поля можно изменять от нуля (постоянное поле) до частот, измеряемых мегагерцами.

Зависимость поля от времени в наибольшей степени определяет характерные особенности метода: способ возбуждения и измерения поля, геологические условия, в которых может быть использован

метод, а также те задачи, для решения которых метод применяется. Поэтому классификацию электроразведочных методов можно про- зводить по данному признаку.

Методы постоянного поля (частота 0) включают:

- 1) метод естественного электрического поля;
- 2) метод сопротивлений — электрическое профилирование, электрическое зондирование;
- 3) метод заряда;
- 4) метод эквипотенциальных линий;
- 5) метод отношения потенциалов.

Методы низкочастотных и нестационарных переменных полей (частота 10^{-2} — 10^4 Гц) включают:

- 1) метод вызванных потенциалов;
- 2) метод магнитотеллурического поля — магнитотеллурическое зондирование, магнитотеллурическое профилирование;
- 3) частотное электромагнитное зондирование;
- 4) зондирование становлением поля (время становления 10^0 — 10^2 с);
- 5) низкочастотные индуктивные методы (наземные, аэро- и скважинные варианты);
- 6) метод переходных процессов (время становления 10^{-3} — 10^{-2} с).

Методы переменных полей радиоволновых частот (частота 10^5 — 10^7 Гц) включают:

- 1) метод просвечивания;
- 2) радиоволновое профилирование;
- 3) радиокомпарационный метод.

В зависимости от природы исследуемых электромагнитных полей выделяют методы естественных полей и методы искусственных полей. Вторая группа методов более многочисленна, что связано с разнообразием способов возбуждения поля. В зависимости от расположения источников поля и точек наблюдения различают наземные, подземные (скважинные и шахтные), морские и аэроэлектроразведочные методы.

Электроразведочные исследования проводятся в тесной связи с другими геофизическими и геологическими исследованиями.

Эта связь обусловлена тем, что электроразведочные работы — один из этапов геологоструктурных или геологопоисковых работ. Конкретные задачи, решаемые при помощи электроразведки, вытекают из результатов предшествующих геологических работ, а данные, полученные в результате применения электроразведки, определяют методику и направление последующих геологических исследований.

Комплексирование электроразведки с другими геофизическими методами позволяет в значительной мере избавиться от неоднозначности в решении обратной задачи, т. е. повысить степень достоверности геологической интерпретации результатов полевых наблюдений.

Электроразведка, как и вся разведочная геофизика, является наукой сравнительно молодой. Первые работы по применению электричества при поисках полезных ископаемых относятся к середине прошлого столетия. В 1829 году А. Фокс наблюдал над медно-колчеданными месторождениями Корнуэльса (Англия) естественные электрические поля, связанные с окислительно-восстановительными процессами.

Общий прогресс физики в конце XIX и начале XX столетий коснулся также и методов изучения геологического строения земли; он дал толчок развитию прикладной геофизики в целом и электрических методов разведки в частности.

В 1903 году русским инженером Е. И. Рагозиным была опубликована монография «О применении электричества для разведки рудных залежей». В этой работе приводятся сведения о возможности применения электрических методов для поисков рудных тел и исследования электрических свойств горных пород.

В 1910 году французский ученый К. Шлюмберже разработал метод сопротивлений, нашедший впоследствии широкое применение при геологоструктурных исследованиях.

В 1919—1922 годах шведские ученые Н. Лундберг и К. Зундберг своими работами положили начало электроразведке переменными полями, и в частности методам, основанным на наблюдении эквипотенциальных линий электрического поля и напряженности магнитного поля. Несколько позже в Америке был предложен метод индукции (радиор).

Большую роль в развитии теории электроразведки постоянным током сыграли исследования немецкого ученого И. Гуммеля и в особенности румынского ученого С. Стефанеску, разработавших методы расчета электрических полей точечных источников при наличии плоскопараллельных поверхностей раздела.

В 1924 году основоположник отечественной электроразведки А. А. Петровский провел впервые в Советском Союзе электроразведочные работы методом естественного поля (Риддерское полиметаллическое месторождение на Алтае) и эквипотенциальных линий (Белоусовский рудник на Алтае). В 1925 году метод эквипотенциальных линий был поставлен на переменном токе и в этой модификации в последующие годы широко опробован на сульфидных месторождениях СССР. К 1925 году относятся также первые опытные работы по применению метода интенсивности, проведенные на Урале (Богомоловский рудник). С 1926 года в практику электроразведочных работ входит метод индукции.

С 1928 года А. А. Петровский проводит систематические исследования в области радиоволновых методов разведки.

Таким образом, в двадцатые годы нашего столетия электроразведка используется в основном при поисках и разведке рудных месторождений. Однако проводившиеся работы носили в значительной мере опытный характер, объем производственных работ был невелик.

Переход нашей страны от восстановления к реконструкции народного хозяйства вызвал резкий рост геологоразведочных работ, имевших целью обеспечение промышленности необходимым сырьем и топливом. Возрос также объем геофизических, и в частности электроразведочных, работ. Электроразведочные работы проводятся на Северном и Южном Урале, в Западной Сибири (Салаирский кряж, Саяны), в Казахстане, Средней Азии, Восточной Сибири, на Дальнем Востоке. Объектом электроразведочных исследований, помимо месторождений железа и цветных металлов, становятся залежи нефти, угля, золота, редких металлов и других полезных ископаемых.

В 1928—1929 годах электроразведка начинает применяться для поисков и разведки нефтеносных и газоносных структур. В последующие годы объем этих работ существенно возрастает в соответствии с общим увеличением объема геофизических работ при поисках нефти и газа и организацией геофизической службы в нефтяной промышленности.

В 1932 году были проведены первые электроразведочные работы с целью поисков и разведки месторождений ископаемых углей. В этой области геологических исследований электроразведка получила применение как метод изучения геологической структуры угольных бассейнов и поисков угольных пластов, а также угленосных свит.

В 1930 году А. С. Семенов проводит первые электроразведочные работы для решения гидрогеологических и инженерно-геологических задач. Большие успехи в этой области были достигнуты в послевоенные годы в связи с расширением гидротехнического строительства и изысканий для водоснабжения сельского хозяйства.

В послевоенные годы в развитии электроразведки наступил новый этап, связанный с разработкой и широким применением методов, основанных на изучении вызванной поляризации горных пород, индуктивных методов, использующих гармонические и нестационарные поля, электромагнитных зондирований, а также аэроэлектроразведочных методов.

Расширение области применения электроразведки потребовало дальнейшей разработки теории электроразведки, методики полевых работ и истолкования результатов наблюдений. Эти задачи успешно решаются большим коллективом ученых и инженеров-электроразведчиков, работающих в научно-исследовательских и производственных геофизических организациях. Большую роль в разработке теории электроразведки постоянным током сыграли работы А. И. Заборовского, Л. М. Альпина, В. Н. Дахнова, А. Н. Тихонова, А. П. Краева, Е. Н. Каленова, А. М. Пылаева и др. В развитии теории других электроразведочных методов большое значение имели работы Е. А. Сергеева (метод естественного тока), А. С. Семенова (метод заряда), А. Г. Гархова, А. М. Пылаева, И. Г. Михайлова (метод индукции), В. Н. Дахнова (метод петли) и др.

Затраты на электроразведочные работы в настоящее время

составляют 35% от общих затрат на геофизические работы по СССР в целом.

Число же электроразведочных партий, включая геофизические партии, применяющие электроразведку в комплексе с другими геофизическими методами, составляет около 60% всех геофизических партий, выезжающих ежегодно на полевые работы.

Как известно, народнохозяйственные планы предусматривают дальнейшее развитие геологоразведочных работ с целью поисков и разведки месторождений всех видов минерального сырья и увеличения разведанных запасов. Широкое внедрение геофизических методов в геологоразведочные работы будет способствовать повышению эффективности поисков и разведки полезных ископаемых.

Глава I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

§ 1. УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Удельное электрическое сопротивление какого-либо вещества ρ численно определяется сопротивлением, оказываемым одним кубическим сантиметром вещества, взятого в виде куба, электрическому току, направленному перпендикулярно к одной из граней этого куба.

В зависимости от выбранной системы единиц удельное сопротивление измеряется в ом-сантиметрах или ом-метрах. В электротехнике пользуются ом-метром, как более крупной единицей ($1 \text{ Ом/м} = 100 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Величина, обратная удельному сопротивлению $\gamma = 1/\rho$, называется удельной электропроводностью. Ее размерность — сименс на метр или сименс на сантиметр (См/м , См/см).

Горную породу в качестве проводника электрического тока можно рассматривать как агрегат, состоящий из твердого минерального скелета, жидкости и газов. На удельное сопротивление такого агрегата влияют следующие факторы:

- 1) удельное сопротивление минералов, слагающих твердую часть породы (ее скелет);
- 2) удельное сопротивление жидкостей и газов, заполняющих поры породы;
- 3) влажность породы;
- 4) пористость породы;
- 5) структура породы, форма и взаимное расположение ее пор;
- 6) процессы, происходящие на контакте поровой жидкости и минерального скелета.

Рассмотрим влияние каждого из этих факторов.

В табл. 1 приведены значения удельного сопротивления главных породообразующих и рудных минералов. Как следует из табл. 1, сопротивление породообразующих минералов, в том числе всех минералов силикатной группы, очень велико и колеблется от 10^6 до 10^{15} Ом·м.

Сопротивление самородных металлов, обладающих электронной проводимостью, колеблется в пределах $10^{-8} - 10^{-4}$ Ом·см.

Большинство рудных минералов по характеру проводимости относится к полупроводникам. Среди них можно выделить очень хорошо проводящие минералы ($10^{-5} - 10^{-1}$ Ом·см) и минералы, сравнительно плохо проводящие ($10^0 - 10^5$ Ом·см).

Удельное сопротивление жидкости, насыщающей горную породу, может меняться в широких пределах. В большинстве случаев эта жидкость является водным раствором различных минеральных солей, среди которых важную роль играет хлористый натрий NaCl. Удельное сопротивление воды, заполняющей поры горных пород, находится в обратной зависимости от концентрации растворенных солей. На рис. 1 изображена кривая зависимости сопротивления раствора NaCl от его концентрации в воде. Кривая построена на двойной логарифмической сетке, т. е. по координатным осям отложены десятичные логарифмы сопротивления раствора и его концентрации в граммах на литр.

В природных условиях наименьшим сопротивлением (1 Ом·м и менее) обладают глубинные сильноминерализованные, а также морские воды. Сопротивление подземных вод в зависимости от их минерализации колеблется от 10^{-2} до 10^2 Ом·м. Значительно большим сопротивлением (порядка десятков и сотен ом-метров) обладают слабоминерализованные речные воды; еще большее сопротивление (до 1500 Ом·м) вследствие малой минерализации имеют дождевые воды.

На сопротивление воды, находящейся в порах горной породы, оказывает влияние ее температура.

Зависимость сопротивления раствора от его температуры выражается формулой

$$\rho_t = \frac{\rho_{18^\circ}}{1 + \alpha(t - 18^\circ)},$$

где ρ_t — сопротивление раствора при температуре t ; ρ_{18° — сопротивление раствора при температуре 18°C ; α — температурный коэффициент электропроводности, в среднем равный $0,025$ $1/^\circ\text{C}$.

Следует иметь в виду, что зависимость удельного сопротивления горных пород от температуры более сложна, чем приведенная выше зависимость для чистых электролитов.

Поры горных пород могут быть заполнены, помимо водных растворов, нефтью. Удельное сопротивление нефти весьма велико; оно достигает 10^{16} Ом·см, т. е. практически нефть является изолятором.

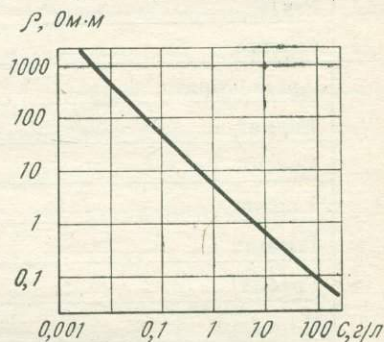


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления раствора NaCl от его концентрации в воде

Из изложенного следует, что минеральный скелет породы обычно проводит ток несравненно хуже, чем растворы, заполняющие ее поры. Таким образом, в горных породах ¹ электрический ток течет практически только через электролиты, заполняющие ее поры. В связи с этим электропроводность горной породы в основном является электролитической (ионной). Отсюда следует, что влажность горной породы должна сильно влиять на ее удельное сопротивление.

Если обозначить через $\rho_{\text{в}}$ сопротивление породы в состоянии полной влагонасыщенности, через $k_{\text{в}}$ — коэффициент, равный отношению объема части порового пространства, занятого влагой, к полному объему порового пространства, то сопротивление породы при данной влажности $\rho_{\text{кв}}$ можно вычислить по следующей эмпирической формуле:

$$\rho_{\text{кв}} = k_{\text{в}}^{-2,15} \rho_{\text{в}}$$

Следует отметить, что если горная порода находится ниже уровня грунтовых вод, поровое пространство ее полностью насыщено влагой. В этом случае абсолютное значение влажности определяется пористостью породы, вследствие чего пористые породы в природных условиях чаще всего обладают низким сопротивлением.

На поверхности раздела жидкой и твердой фаз, слагающих горную породу, т. е. на контакте минерального скелета и поровой жидкости, происходит процесс адсорбции ионов (обычно анионов). Адсорбированные на поверхности минерального скелета, эти ионы образуют жестко связанную с ней обкладку двойного электрического слоя. Оставшиеся в избытке в растворе ионы противоположного знака образуют вторую обкладку двойного слоя. Внутренняя часть этой обкладки также жестко связана на поверхности раздела фаз, а внешняя имеет диффузное строение — концентрация зарядов в ней убывает по мере удаления от поверхности раздела. В целом при отсутствии внешнего электрического поля двойной слой электрически нейтрален.

Влияние двойного электрического слоя на общее сопротивление породы заключается прежде всего в том, что в пределах этого слоя поровая жидкость обычно обладает большей концентрацией ионов, и, вследствие этого, повышенной электропроводностью. В связи с этим проводимость породы возрастает по мере увеличения площади поверхности раздела между твердой и жидкой фазами. В природных условиях тонкодисперсные породы (в частности, глины) обычно лучше проводят электрический ток, чем породы грубозернистые.

Зависимость сопротивления горных пород от ее структуры поясняется рис. 2, а и б. На рис. 2, а в схематическом виде изображена горная порода, в которой минеральный скелет и поры беспорядочно ориентированы в пространстве. Удельное сопротивление такой породы будет одинаковым в любом направлении (изотропная порода).

¹ За исключением некоторых руд и пород, о которых будет сказано ниже.

На рис. 2, б изображена порода, в которой минеральный скелет и поры имеют вытянутую форму. Это приводит к тому, что условия протекания тока через породу становятся неодинаковыми для различных направлений. Сопротивление такой породы зависит от направления, т. е. порода в электрическом отношении а н и з о т р о п н а. В направлении, обозначенном на рис. 2 пунктирной стрелкой, удельное сопротивление породы будет больше, чем в направлении, совпадающем с ориентировкой минеральных зерен и пор между ними.

Если обозначить удельное сопротивление в первом направлении через ρ_n , а во втором направлении — через ρ_t , то согласно сказанному выше $\rho_n > \rho_t$.

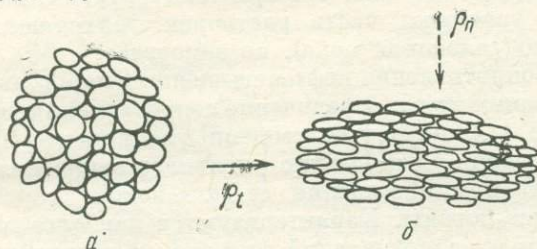


Рис. 2. Структура минерального скелета горной породы.
а — изотропная; б — анизотропная.

Корень квадратный из отношения ρ_n к ρ_t носит название коэффициента микроанизотропии и обозначается через λ_μ :

$$\lambda_\mu = \sqrt{\rho_n/\rho_t}.$$

Для горных пород значение этого коэффициента колеблется от 1 (изотропные породы) до 2 и лишь в редких случаях превышает эту величину.

Поскольку пористость, влажность и структура различны для трех основных генетических групп горных пород — осадочных, изверженных и метаморфических, соответственно различно и сопротивление этих пород.

Осадочные породы. Характеризуются низкими по сравнению с другими типами пород сопротивлениями. Это объясняется их значительной пористостью, а при условии залегания ниже уровня грунтовых вод — и повышенной влажностью.

Однако среди пород этой группы можно выделить некоторые породы, отличающиеся повышенным сопротивлением. К ним относятся, например, сухие пески, плотные и малопористые гидрхимические осадки — гипсы, ангидриты и др.

Характерным для осадочных пород является то, что удельное сопротивление глин обычно меньше удельного сопротивления песков. Это объясняется, с одной стороны, существенным влиянием воды, связанной на поверхности раздела твердой и жидкой фаз, с другой — тем что в глинах вследствие их плохой проницаемости грунтовые

воды застаиваются и минерализация увеличивается за счет выщелачивания минеральных солей из твердого скелета породы. Минерализация же вод в хорошо фильтрующихся песчаных породах, как правило, ниже, особенно при насыщении их пресными атмосферными осадками.

Удельное сопротивление мерзлых пород значительно больше, чем сопротивление тех же пород в талом состоянии. Так, например, удельное сопротивление многолетнемерзлых рыхлых пород колеблется от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч ом-метров. Небольшое по сравнению со льдом сопротивление мерзлых пород в основном объясняется тем, что при температурах, встречающихся в природных условиях, часть растворов, находящихся в порах горной породы (связанная вода), не замерзает.

Удельное сопротивление нефтенасыщенных пород растет с увеличением содержания нефти. Увеличение сопротивления нефтенасыщенной породы с ростом нефтенасыщенности характеризуется коэффициентом Q , равным отношению удельного сопротивления той же породы при полном насыщении ее пор водой.

Изверженные породы. Характеризуются наиболее высокими значениями удельных сопротивлений. Это вполне согласуется с тем, что именно данной группе пород свойственна очень малая по сравнению с остальными горными породами пористость. Сопротивление плотных изверженных пород измеряется тысячами и иногда десятками тысяч ом-метров.

Сопротивление трещиноватых изверженных пород в том случае, когда трещины служат путями для циркуляции подземных вод, ниже, чем сопротивление тех же пород в массивном залегании (сопротивление сильнотрещиноватых пород достигает сотен ом-метров).

Метаморфические породы. По своему удельному сопротивлению они занимают промежуточное положение между осадочными и изверженными породами. Пористость и влажность метаморфических пород зависят главным образом от степени их метаморфизации, поэтому удельное сопротивление пород тем больше, чем больше степень их метаморфизма. Так, например, удельное сопротивление сильнометаморфизованных гнейсов измеряется тысячами ом-метров, т. е. близко к сопротивлению гранитов; сопротивление же глинистых сланцев при достаточном их увлажнении может измеряться всего лишь несколькими десятками ом-метров.

Среди метаморфических пород своим малым удельным сопротивлением выделяются графитизированные и углефицированные породы, главным образом сланцы. Сопротивление этих пород понижается за счет наличия электронно-проводящего графита и сильно метаморфизованного распыленного углистого материала. При достаточно высоком содержании графита сопротивление графитизированных сланцев может измеряться десятками долями ом-метра. Обычно оно колеблется от единиц до нескольких десятков ом-метров.

Околорудные и приконтактовые изменения горных пород, сопровождающиеся вторичной минерализацией и изменением пористости,

могут существенно сказаться на величине их удельного сопротивления. В качестве примера укажем, что окварцевание рудовмещающих пород обычно ведет к увеличению их удельного сопротивления.

Для метаморфических пород вследствие динамических воздействий, которым они подвергались, характерна сложная текстура, при которой частицы породы, а следовательно, и поры вытянуты по направлению сланцеватости. В связи с этим сопротивление породы по сланцеватости становится меньше, чем вкрест ее. Таким образом, метаморфическим породам часто свойственна электрическая анизотропия.

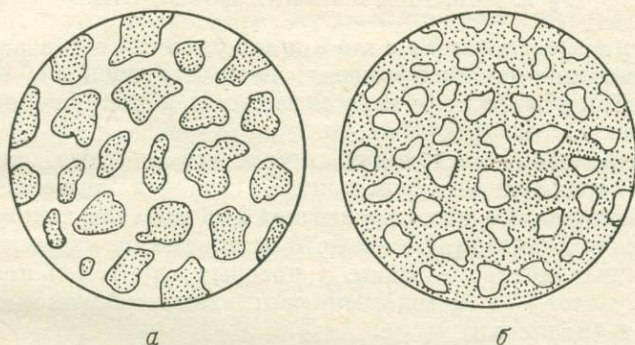


Рис. 3. Соотношение хорошо и плохо проводящих компонентов в рудах.

а — нерудный плохо проводящий цемент — руда высокого сопротивления; б — рудный, хорошо проводящий цемент — руда низкого сопротивления.

Удельное сопротивление руд в том случае, если в их состав входят такие хорошо проводящие минералы, как пирит, халькопирит, пирротин, галенит и другие, определяется процентным содержанием хорошо проводящих минералов и их структурно-текстурным взаимоотношением с плохо проводящими минералами.

Наибольшей проводимостью обладают массивные колчеданные и полиметаллические руды, удельное сопротивление которых колеблется от сотых долей до единиц ом-метров. Исключение составляют массивные колчеданные руды, содержащие плохо проводящий сфалерит, причем последний обволакивает пленкой зерна пирита и халькопирита. В этом случае удельное сопротивление руды может достигать сотен ом-метров.

Жильные полиметаллические руды обычно имеют весьма непостоянное в пределах одного и того же месторождения сопротивление. Это связано со сложным и изменчивым минералогическим составом руды, в который обычно помимо хорошо проводящих сульфидных минералов входят также плохо проводящие рудные и нерудные минералы, такие, как сфалерит, арсенопирит, окислы сульфидов, кварц, полевой шпат, кальцит и др.

Удельное сопротивление вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд зависит от пространственного соотношения рудных и нерудных компонентов. В том случае, когда плохо проводящие минералы заполняют пространство между отдельными вкраплениями рудных минералов (рис. 3, а), сопротивление вкрапленных руд мало отличается от сопротивления вмещающих пород.

Значительно меньшим сопротивлением обладают породы, в которых рудные минералы цементируют участки, сложенные нерудными минералами (рис. 3, б).

§ 2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ

Под электрической постоянной ϵ какого-либо вещества понимается коэффициент, равный отношению напряженности электрического поля в этом веществе к напряженности поля в вакууме.

Диэлектрическая постоянная горных пород существенно сказывается на характере электромагнитных полей в Земле лишь в том случае, когда частота поля превышает десятки, а в некоторых случаях и тысячи килогерц. В связи с этим параметр ϵ играет роль лишь в тех методах электроразведки, в которых изучаются поля радиоволновых частот — в методах просвечивания, радиокомпарации и пеленгации (радиокип) и др.

Диэлектрическая постоянная большинства породообразующих минералов, в том числе всех минералов силикатной группы, колеблется от 3 до 10 и редко достигает 25. Диэлектрическая постоянная воды около 81. Отсюда следует, что диэлектрическая постоянная горных пород существенно зависит от их влажности.

Для пород с относительно малой влажностью w эта зависимость описывается следующей эмпирической формулой: $\epsilon = \epsilon_0 w^n$, где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость сухой породы; n — коэффициент, зависящий от структуры породы.

§ 3. ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ

Если какой-либо объем горной породы или руды оказывается в электрическом поле, то под влиянием этого поля породы или руды поляризуются.

Процесс поляризации ионно-проводящих горных пород заключается в деформации под влиянием поляризирующего поля двойных электрических слоев, образующихся на границе твердой и жидкой фаз (см. гл. VIII). Горные породы и руды, обладающие электронной проводимостью, поляризуются за счет образования двойных электрических слоев, возникающих на контакте сред с электронной и ионной проводимостью, если через этот контакт протекает электрический ток.

Внешне процессы поляризации горных пород и руд проявляются в том, что первичное (поляризирующее) электрическое поле

оказывается искаженным за счет наложения на него вторичного поля, создаваемого поляризованными участками среды. После того как первичное поле перестает существовать, вторичное поле постепенно исчезает вследствие разрядки двойных слоев на контакте электронных и ионных проводников или по мере упругого восстановления электрического равновесия двойных слоев на контакте жидкой и твердой фаз.

Поляризация горных пород и руд связана с процессами на поверхностях раздела жидкой и твердой фаз внутри породы. Эти поверхности имеют очень сложную форму, а свойства компонент горной породы, разделенных этими поверхностями, меняются в широких пределах. В соответствии с этим процесс поляризации горной породы, если его рассматривать детально, очень сложен. Практически при разработке теоретических основ электроразведки вызванная поляризация горных пород рассматривается как суммарный объемный процесс, интенсивность которого характеризуется интенсивностью вторичного поля, создаваемого единицей объема поляризуемой среды.

Для характеристики поляризационных свойств среды используется параметр η , называемый п о л я р и з у е м о с т ь ю с р е д ы:

$$\eta = -4\pi P_{ВП}/E,$$

где $P_{ВП}$ — момент поляризации единицы объема среды; E — напряженность поляризующего поля.

Знак минус указывает на то, что поляризующее поле и момент поляризации направлены противоположно.

Поскольку при изучении поляризуемости практически измеряется не момент поляризации, а разность потенциалов, то удобнее пользоваться несколько иным способом определения η :

$$\eta = \frac{E_{ВП}}{E} \cdot 100\% = \frac{\Delta U_{ВП}}{\Delta U} \cdot 100\%;$$

здесь $E_{ВП}$ и $\Delta U_{ВП}$ — напряженность и разность потенциалов поля, создаваемого поляризованной средой между двумя точками этой среды; E и ΔU — напряженность и разность потенциалов поляризующего поля между теми же точками среды.

При этом предполагается, что среда однородна. Коэффициент η является величиной безразмерной и выражается в процентах.

Экспериментально установлено, что поляризуемость горных пород и руд в пределах, представляющих интерес для электроразведчиков, не зависит от напряженности поляризующего поля.

Поляризуемость пород и руд, содержащих электронно-проводящие компоненты, в большой степени зависит от площади поверхности раздела между электронными и ионными проводниками, приходящейся на единицу объема. В связи с этим породы, содержащие рассеянные вкрапления электронных проводников и в том числе вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды, обладают большой

поляризуемостью. Весьма интенсивно поляризуются графитизированные и углефицированные породы.

Поляризуемость пород и руд, содержащих электронно-проводящие включения, возрастает с повышением влажности и уменьшением минерализации растворов. Весьма интересна в практическом отношении зависимость поляризации вкрапленных руд от процентного содержания вкрапленников.

Из приведенного выше следует, что с увеличением объемного содержания вкрапленников поляризация должна возрасти. Экспериментально получена следующая зависимость η от объемного содержания вкрапленников:

$$\eta = \beta \xi / (1 + \beta \xi),$$

где ξ — объемное содержание вкрапленников в руде; β — коэффициент, зависящий от состава и структуры вкрапленников, а также от момента измерения $\Delta U_{\text{ВП}}$ ¹.

Поляризуемость пород, содержащих электронные проводники, колеблется от единиц до десятков процентов.

Поляризуемость ионно-проводящих горных пород в целом значительно меньше поляризуемости пород, содержащих электронные проводники, и не превышает нескольких процентов. В данном случае η зависит главным образом от влажности и концентрации солей во внутрипоровой влаге, а также от гранулометрического состава породы. С повышением влажности и минерализации поровой влаги поляризуемость породы уменьшается.

Среди ионно-проводящих пород минимальной поляризуемостью обладают глины и пески, насыщенные минерализованными водами (доли процента и реже первые единицы процентов). Максимальная поляризуемость (до 3—4%) характерна для массивных кристаллических пород.

¹ Рекомендуется при измерениях $\Delta U_{\text{ВП}}$ момент измерения принимать равным 0,5 с.

Глава II

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПОСТОЯННЫМИ ПОЛЯМИ

§ 1. НОРМАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Для того чтобы создать в земле постоянное электрическое поле, два полюса какого-либо источника тока — батареи сухих элементов, генератора — заземляют при помощи двух заземлений, которые располагают в соответствии с особенностями того или иного электро-разведочного метода. Заземления устраивают из металлических электродов различной формы, погруженных в землю на разную глубину. Электрическое поле, создаваемое в земле такими заземлениями, будем сокращенно называть полем заземлений. Поля заземлений различного типа зависят от размера, количества и конфигурации электродов, их взаимного расположения, силы тока, посылаемого в землю через эти электроды, и, наконец, от характера геоэлектрического разреза. Поскольку изучение геоэлектрического разреза — основная задача электроразведочных работ, наибольший интерес представляет зависимость поля заземлений от характера геоэлектрического разреза. Для того чтобы по наблюдаемому полю одного заземления или совокупности нескольких заземлений составить суждение о характере геоэлектрического разреза, следует в процессе интерпретации сравнивать между собой наблюдаемые поля и поля над известными геоэлектрическими разрезами. Простейшим геоэлектрическим разрезом является однородное полупространство, и поэтому поле, создаваемое над ним одним заземлением или совокупностью заземлений, чаще всего служит тем эталоном, с которым сравнивают результаты полевых наблюдений.

Поле заземления или совокупности заземлений, расположенных на плоской поверхности раздела земля — воздух, при условии, что нижнее полупространство заполнено однородной и изотропной проводящей средой, мы в дальнейшем будем называть н о р м а л ь - н ы м п о л е м. Ниже будут рассмотрены нормальные поля, с которыми чаще всего приходится встречаться в электроразведке.

Поле точечных заземлений. Пусть на поверхности земли расположены два заземления A и B в виде двух полусфер, погруженных в землю до экваториальной плоскости (рис. 4). Электрическое поле этих заземлений в любой точке нижнего полупространства, в частности в точке M , будет суммой полей, создаваемых заземлениями A и B . Если одно из этих заземлений отнести на расстояние, достаточно большое по сравнению с расстоянием между вторым заземлением и точкой M , то поле в этой точке практически будет создаваться лишь ближним заземлением. Определим поле этого заземления в зависимости от удельного сопротивления ρ среды, заполняющей нижнее полупространство, положения точки наблюдения M и силы тока I , поступающего в землю через полусферическое заземление. Расстояние между точкой A , в которой расположен центр полусферического заземления, и точкой M обозначим через r (рис. 5).

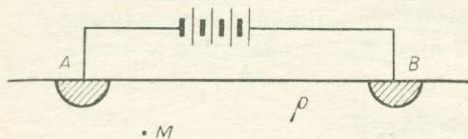


Рис. 4. Цепь с двумя полусферическими электродами.

Решение задачи упрощается, так как ток, поступающий из заземления в нижнее полупространство, вследствие однородности послед-

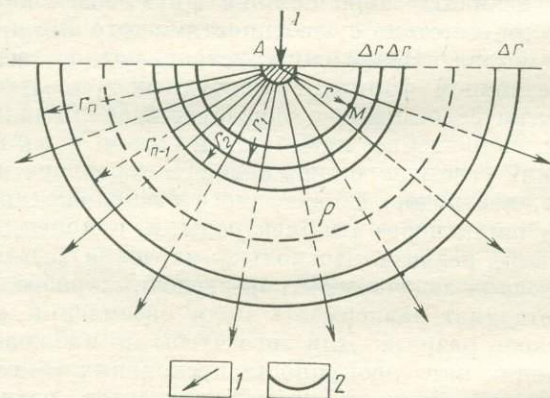


Рис. 5. Поле полусферического заземления. Линии: 1 — токовые, 2 — эквипотенциальные.

него растекается одинаково во все стороны. Токовые линии в этом случае совпадают с радиальными прямыми, выходящими из центра полусферического заземления, а эквипотенциальные поверхности, которые должны быть перпендикулярными к токовым линиям, представляют собой систему концентрических полусфер с центром в точке A .

Проведем систему эквипотенциальных поверхностей, из которых первая проходит через точку M , вторая отстоит от первой на расстоянии Δr , бесконечно малом по сравнению с r , третья — на рас-

стоянии $2\Delta r$ от первой, четвертая на расстоянии $3\Delta r$ и т. д. Очевидно, что таким образом мы получим ряд полусферических поверхностей с непрерывно увеличивающимися радиусами:

$$r_1 = r + \Delta r, \quad r_2 = r_1 + \Delta r, \\ r_3 = r_2 + \Delta r, \quad \dots, \quad r_n = r_{n-1} + \Delta r \text{ и т. д.}$$

Потенциал поверхности с радиусом r_n обозначим через U_{r_n} . Найдем выражение для разности потенциалов ΔU между двумя соседними эквипотенциальными поверхностями, рассматривая заключенный между ними полусферический слой как линейный проводник. При этом отметим, что сила тока, текущего через полусферический слой, равна I , т. е. силе тока, поступающего в землю через электрод.

Согласно закону Ома для линейных проводников $\Delta U_{rr_1} = U_{r_1} - U_r = IR$, где R — сопротивление полусферического слоя.

Величина R может быть выражена по известной из физики формуле следующим образом:

$$R = \rho l / s,$$

где ρ — удельное сопротивление проводника; l — его длина; s — поперечное сечение.

В интересующем нас случае l равно Δr , а s — среднему значению площади поперечного сечения полусферического слоя, заключенного между поверхностями с радиусами r и $r + \Delta r$:

$$s = 2\pi (r + \Delta r/2)^2.$$

Следовательно,

$$R = \rho \Delta r / 2\pi (r + \Delta r/2)^2.$$

Последнее выражение может быть записано и так:

$$R = \rho (r_1 - r) / 2\pi (r^2 + r \Delta r + \Delta r^2/4).$$

Учитывая, что Δr намного меньше r и, следовательно, величина $\Delta r^2/4$ мала по сравнению с остальными членами, стоящими в скобках, можно написать

$$R = \rho \frac{r_1 - r}{2\pi r (r + \Delta r)} = \frac{\rho}{2\pi} \frac{r_1 - r}{r_1 r} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Таким образом, выражение для ΔU_{rr_1} окончательно будет иметь следующий вид:

$$\Delta U_{rr_1} = U_{r_1} - U_r = - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right).$$

Наличие знака минус здесь объясняется тем, что ток течет от точек с высоким потенциалом к точкам с низким потенциалом, т. е. с увеличением r потенциал уменьшается.

Совершенно аналогично

$$\Delta U_{r_1 r_2} = U_{r_2} - U_{r_1} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

$$\Delta U_{r_2 r_3} = U_{r_3} - U_{r_2} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right),$$

.....

$$\Delta U_{r_{n-1} r_n} = U_{r_n} - U_{r_{n-1}} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right).$$

Суммируя левые и правые части написанных выражений, для ΔU получим

$$U_r - U_{r_n} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right).$$

Если радиус последней окружности взять бесконечно большим, то в левой части равенства окажется разность потенциалов между точкой M и точкой, расположенной в бесконечности. Так как потенциал точек в бесконечности равен нулю, эта разность представляет собой потенциал точки M .

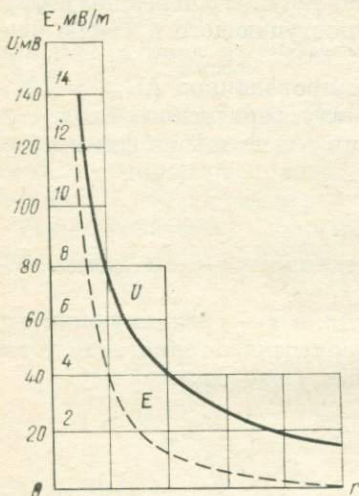


Рис. 6. Графики потенциала U и напряженности E нормального электрического поля полусферического заземления.

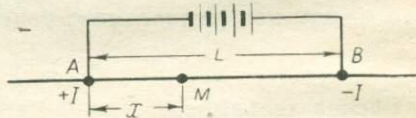


Рис. 7. Пояснение к расчету поля двух полусферических заземлений.

При $r_n \rightarrow \infty$ второй член в скобках в первой части уравнений превращается в нуль. Таким образом, мы приходим к выражению для потенциала, создаваемого полусферическим заземлением в однородной и изотропной среде:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r}. \quad (\text{II.1})$$

На рис. 6 изображен график зависимости потенциала полусферического заземления, питаемого током силой $I = 1$ А, от расстояния до этого источника в среде с удельным сопротивлением 1 Ом·м. При изменении силы тока или удельного сопротивления среды характер графика сохраняется; изменяется лишь масштаб по оси ординат.

Напряженность электрического поля, создаваемого полусферическим заземлением, определяется как производная от потенциала

этого поля по направлению радиуса-вектора, проведенного из источника в точку M , взятая с обратным знаком:

$$E = -dU/dr = -d \left(\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r} \right) / dr$$

или

$$E = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r^2}. \quad (\text{II.2})$$

График зависимости E от расстояния r до источника тока показан на рис. 6.

Рассмотрим случай, когда оба полусферических заземления находятся на соизмеримых расстояниях от точки наблюдения M и, следовательно, поле в этой точке создается обоими заземлениями (рис. 7). Поскольку в дальнейшем нас будет интересовать поле на поверхности земли, точку M расположим на этой поверхности.

Обозначим расстояние от заземления A до точки M через x , расстояние между заземлениями A и B через L и найдем зависимость U от x .

Потенциал U_{MA} , создаваемый заземлением A в точке M , согласно формуле (II.1)

$$U_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{|x|}.$$

Потенциал U_{MB} , создаваемый в той же точке заземлением B ,

$$U_{MB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{|L-x|}.$$

Знак минус в этом выражении объясняется тем, что электрод B подключен к отрицательному полюсу источника тока.

Потенциал U_M , создаваемый в точке M обоими заземлениями, равен сумме потенциалов U_{MA} и U_{MB} :

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{|x|} - \frac{1}{|L-x|} \right). \quad (\text{II.3})$$

График зависимости потенциала от x изображен на рис. 8. Заметим, что при $x \rightarrow 0$ и $x \rightarrow L$ потенциал стремится соответственно к положительной и отрицательной бесконечности, а при $x = L/2$ он меняет свой знак, проходя через нулевое значение. На рис. 9 показаны токовые и эквипотенциальные линии поля двух полусферических заземлений для вертикальной плоскости, проходящей через линию AB .

Найдем напряженность электрического поля E_x в точках прямой, соединяющей оба заземления. Для этого надо взять первую производную от потенциала по расстоянию с обратным знаком:

$$E_x = -\frac{dU}{dx} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(L-x)^2} \right]. \quad (\text{II.4})$$

График зависимости E_x от x изображен на рис. 8. В средней трети отрезка AB напряженность поля мало меняется с изменением x .

Это обстоятельство используется в некоторых модификациях электрических методов разведки.

Рассмотрим распределение плотности тока, посылаемого в землю при помощи заземлений A и B , в вертикальной плоскости QQ' , которая проходит через середину прямой, соединяющей точки расположения питающих заземлений A и B (точка O , рис. 10, а). Пусть эти заземления питаются током соответственно $+I$ и $-I$.

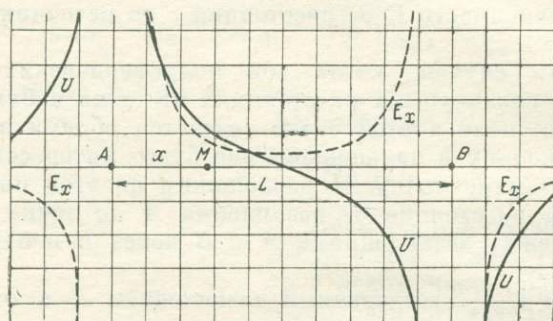


Рис. 8. Графики потенциала U и напряженности E_x нормального электрического поля двух полушарических заземлений.

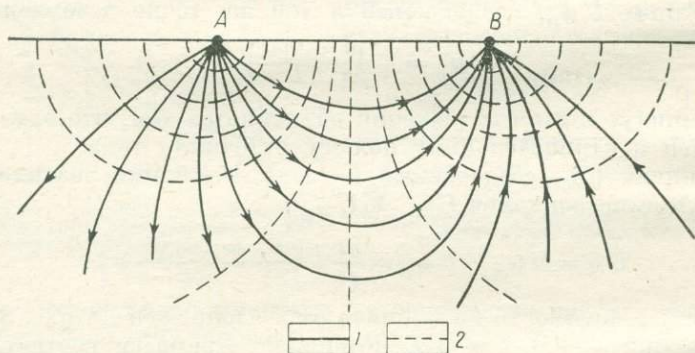


Рис. 9. Токвые и эквипотенциальные линии поля полушарических заземлений в однородной среде.

Линии: 1 — токвые, 2 — эквипотенциальные.

В произвольной точке P этой плоскости, находящейся на глубине h , суммарная плотность тока \mathbf{j}_{AB} равна геометрической сумме плотности тока \mathbf{j}_A и \mathbf{j}_B . Поскольку

$$\mathbf{j}_A = I/2\pi R_A^2 \text{ и } \mathbf{j}_B = -I/2\pi R_B^2,$$

то

$$\mathbf{j}_{AB} = \mathbf{j}_A + \mathbf{j}_B = \frac{I}{2\pi R_A^2} \cos \alpha - \frac{I}{2\pi R_B^2} \cos \beta = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{\cos \alpha}{R_A^2} - \frac{\cos (180^\circ - \alpha)}{R_B^2} \right].$$

Так как плоскость QQ' одинаково удалена от заземлений A и B , то $R_A = R_B = R$, и потому

$$j_{AB} = \frac{I}{\pi R^2} \cos \alpha = \frac{1}{\pi h^2} \sin^2 \alpha \cos \alpha.$$

На дневной поверхности в точке O $h = 0$, $\cos \alpha = 1$, $R = L/2$. Плотность тока в этой точке j_0 согласно приведенному выше выражению

$$j_0 = LI/\pi L^2.$$

Найдем отношение плотности тока j на глубине h к плотности тока j_0 на дневной поверхности в точке O :

$$\frac{j}{j_0} = \frac{I \cos \alpha}{\pi R^2} : \frac{LI}{\pi L^2}.$$

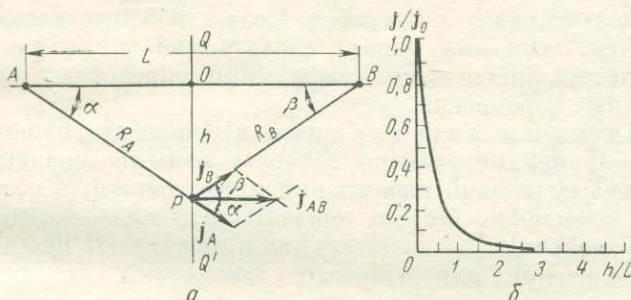


Рис. 10. Распределение плотности тока в поле двух разнополярных точечных источников.

a — пояснение к выводу зависимости плотности тока от расстояния между питающими заземлениями; b — изменение плотности тока с глубиной.

Вследствие того, что $R = L/2 \cos \alpha$,

$$j/j_0 = \left(\frac{L}{2}\right)^3 / R^3 = 1 / \left[1 + \left(\frac{2h}{L}\right)^2\right]^{3/2}. \quad (II.5)$$

Кривая изменения плотности тока с глубиной изображена на рис. 10, б. По оси абсцисс отложена глубина h , выраженная в долях расстояния L , т. е. h/L , по оси ординат — отношение j/j_0 . На глубине $h = AB$ плотность тока составляет примерно 10% от j , а на глубине $h = 3AB$ она практически уменьшается до нуля.

Выражение (II.5), а также кривая, изображенная на рис. 10, б, свидетельствуют о том, что распределение плотности тока с глубиной зависит от расстояния между питающими заземлениями. Чем больше это расстояние, тем больше глубина h , на которой будет наблюдаться заданное значение j/j_0 . Например, при расстоянии между заземлениями A и B , равном 100 м, отношение j/j_0 , равное 0,2, будет наблюдаться на глубине 70 м. При расстоянии между заземлениями 500 м то же отношение j/j_0 будет наблюдаться на глубине 350 м.

Указанная особенность в распределении плотности тока остается справедливой и для неоднородной среды. И в этом случае увеличение

расстояния между питающими заземлениями обычно ведет к повышению относительного значения плотности тока в глубоко расположенных участках геологического разреза. Однако выражение (II.5) в этом случае теряет значение.

При выборе расстояния между питающими заземлениями A и B в какой-либо электроразведочной установке следует добиваться, чтобы заметная часть тока, посылаемого в землю, достигала интересующих нас пластов, рудных тел, даек и т. п. Лишь в этом случае объекты исследования будут влиять на распределение поля в точках дневной поверхности. Таким образом, для увеличения глубины исследования необходимо увеличивать размеры электроразведочных установок.

Из выражений (II.1) — (II.4) следует, что потенциал и напряженность поля полусферических заземлений при заданных значениях ρ и I не зависят от радиуса полусфер. Поле в любой точке наблюдения не изменится, если этот радиус сделать сколько угодно малым. Таким образом, приведенные выражения определяют нормальное поле точечных заземлений.

Под точечным заземлением в дальнейшем будем понимать заземление, линейные размеры которого малы по сравнению с расстоянием между точкой наблюдения и той точкой, в которой расположено заземление. Можно доказать, что поле точечного заземления не зависит от его конструкции и может быть рассчитано при помощи выражений для точечных заземлений полусферической формы. Многие методы электроразведки основаны на изучении полей точечных заземлений.

В электроразведке постоянным током широко применяется стержневой электрод, представляющий собой металлический колышек длиной от нескольких десятков сантиметров до 1—2 м. Поле такого электрода на расстоянии, всего лишь в несколько раз превышающем длину электрода, практически не отличается от поля точечного электрода и может быть подсчитано описанным выше способом.

Поле диполя. Помимо полей, создаваемых точечными источниками, в электроразведке применяют поля, создаваемые электрическими диполями.

Под электрическим диполем понимается совокупность двух одинаковых по величине и обратных по знаку точечных источников поля, расстояние между которыми мало по сравнению с расстоянием от этих источников до точки, в которой определяется поле.

Точечные источники, образующие диполь, называются полюсами диполя. Длиной диполя называется расстояние между его полюсами, осью — прямая, на которой находятся оба полюса.

Найдем выражение для потенциала поля диполя, расположенного на дневной поверхности, в произвольно расположенной точке этой поверхности.

Пусть точка M , потенциал в которой нужно определить, находится, как это показано на рис. 11, a , на расстоянии r_1 и r_2 от обоих полюсов диполя. Расстояние от точки M до центра диполя обозначим через r , угол между r и осью диполя через θ , а длину диполя через l .

Потенциал поля диполя определим как сумму потенциалов обоих полюсов диполя:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_1} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{dr}{r_2 r_1}.$$

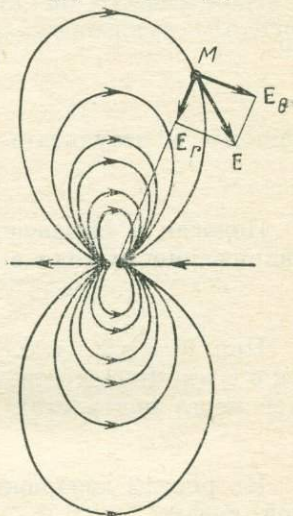
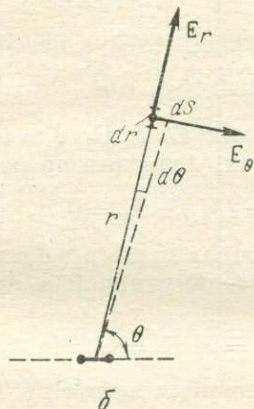
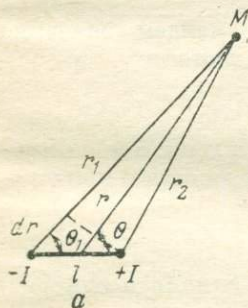


Рис. 11. Электрический диполь.

a — пояснение к выводу выражения для потенциала;
 b — компоненты напряженности поля.

Рис. 12. Токовые линии поля электрического диполя в однородной среде.

Учитывая, что $l \ll r$ и, следовательно, $r_1 \approx r_2 \approx r$, $\theta \approx \theta_1$, а $dr = l \cos \theta$, выражение для U_M запишем в следующем виде:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{l \cos \theta}{r^2}.$$

Обозначим величину $\rho I l / 2\pi$ через P и назовем ее моментом диполя. Таким образом, окончательное выражение для потенциала поля диполя будет иметь вид

$$U_M = P \cos \theta / r^2. \quad (\text{II.6})$$

Напряженность поля диполя в любой точке дневной поверхности может быть представлена в виде двух компонент, одна из которых направлена по радиусу-вектору \mathbf{r} (радиальная компонента E_r), а вторая — по направлению, перпендикулярному к этому вектору (азимутальная компонента E_θ). Обе компоненты показаны на рис. 11.

Компонента E_r определяется как производная от U_M^2 по r , взятая с обратным знаком:

$$E_r = -dU/dr = 2P \cos \theta / r^3. \quad (II.7)$$

Компонента E_θ равна отношению приращения потенциала dU к dS , где dS — перемещение конца вектора r при изменении азимутального угла θ на величину $d\theta$.

Из рис. 11, б следует, что $dS = r d\theta$. Таким образом,

$$E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{dU}{d\theta}$$

но

$$\frac{dU}{d\theta} = -M \sin \theta / r^2,$$

поэтому в результате получаем следующее выражение для E_θ :

$$E_\theta = M \sin \theta / r^3. \quad (II.8)$$

Полагая в выражениях для E_r и E_θ $\theta = 0$, найдем значения напряженности поля в точках, лежащих на оси диполя:

$$E_r = 2M/r^3, \quad E_\theta = 0.$$

При $\theta = \pi/2$, т. е. в точках экваториальной плоскости (плоскости, перпендикулярной к оси диполя и проходящей через центр его),

$$E_r = 0, \quad E_\theta = M/r^3.$$

На рис. 12 изображены токовые линии поля диполя в однородной среде.

Из приведенных выше выражений следует, что напряженность поля точечного источника убывает пропорционально квадрату расстояния между источником поля и точкой наблюдения, в то время как поле диполя убывает пропорционально кубу этого расстояния. В связи с этим при работе с дипольными установками приходится применять источники тока повышенной мощности.

§ 2. ПОЛЯ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Электрические поля источников (заземлений) в неоднородных средах существенно отличаются от рассмотренных выше нормальных полей.

Отклонение поля, наблюдаемого в электрически неоднородной среде, от его нормального значения называют аномалией электрического поля. На изучении аномалий электрического поля основываются все методы электроразведки постоянными полями.

Для того чтобы решить основную задачу электроразведки, т. е. составить суждение о строении геоэлектрического разреза по наблюдаемому на поверхности земли, в горных выработках и скважинах полю, необходимо отчетливо представить характер тех аномалий,

с которыми можно встретиться при изучении геоэлектрических разрезов различного типа. А это, в свою очередь, требует от нас знания расчетов полей различных источников в электрически неоднородных средах. Однако эти расчеты очень сложны и их удается выполнить лишь при некоторых упрощающих предположениях. Для этого реальный геологический разрез, каждая порода в котором в той или иной мере электрически неоднородна, заменяют идеализированным разрезом, состоящим из отдельных областей с электрически однородными средами. Изменение свойств этих сред на их границах происходит скачкообразно. Сложные поверхности, по которым контактируют породы в разрезе, заменяют простыми — плоскими, сфериче-

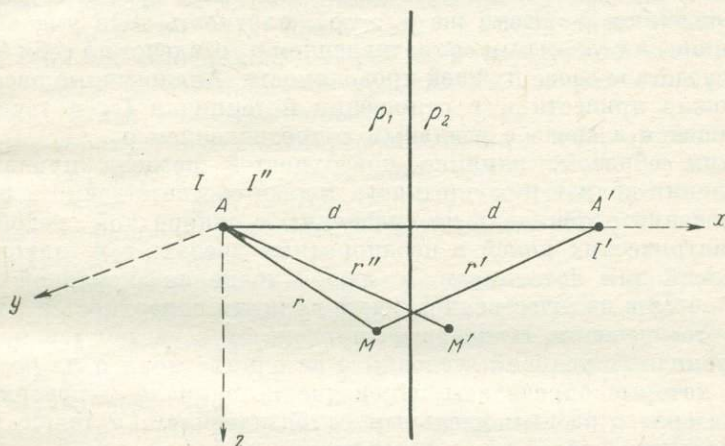


Рис. 13. Пояснение к расчету поля точечного источника тока при наличии в разрезе плоской поверхности раздела.

скими, цилиндрическими и др. В одних случаях эти упрощения не вызывают значительных отклонений этих разрезов от реального геологического (например, при замене разреза с горизонтальными или слабо наклоненными пластами осадочных пород горизонтально-слоистым геоэлектрическим разрезом) и проводимые расчеты позволяют количественно определить мощность и глубину залегания отдельных пластов. В других случаях при сложной геологической обстановке расчеты полей, проводимые на основе указанных выше упрощений, дают возможность лишь качественно судить о местоположении, размере или характере того геологического объекта, который обусловил наблюдаемую аномалию электрического поля. Однако уже и этого качественного суждения достаточно для понимания результатов электрической разведки.

Характер влияния неоднородностей разреза на электрические поля источников, а также особенности расчета полей в неоднородных средах рассмотрим на следующем примере. Пусть в среде с удельным сопротивлением ρ_1 , заполняющей левое полупространство, в точке A расположен источник тока силой I (рис. 13).

Если бы не было второй среды с удельным сопротивлением ρ_2 , заполняющей правое полупространство, то потенциал U_1 в точке M , связанный с источником тока I , был бы равен

$$U_1 = I\rho_1/4\pi r_{AM}. \quad (\text{II.9})$$

Наличие поверхности раздела двух сред с различным удельным сопротивлением обуславливает изменение величины потенциала U_1 в точке M . Это можно объяснить тем, что среда с удельным сопротивлением ρ_2 влияет на плотность тока в области точки M . Если при этом $\rho_2 > \rho_1$, то плотность тока возрастет за счет того, что в объем, занятый средой с удельным сопротивлением ρ_2 , пойдет тока меньше, чем в том случае, если бы этот объем был занят средой с удельным сопротивлением ρ_1 . Если же $\rho_2 < \rho_1$, плотность тока уменьшится, так как среда с удельным сопротивлением ρ_2 отвлечет на себя больше тока вследствие своей лучшей проводимости. Аналогичные рассуждения можно привести и в отношении потенциала U_2 в точке M , находящейся в среде с удельным сопротивлением ρ_2 .

Таким образом, влияние поверхностей раздела проявляется в изменении вблизи них плотности тока и соответственно в изменении значений потенциала по сравнению с однородной средой. Расчет электрических полей в неоднородных средах, т. е. нахождение выражений для потенциала в любой точке неоднородной среды, заключается в количественном учете влияния поверхностей раздела.

Строгое решение таких задач проводится с учетом так называемых граничных условий, условий у источника поля и на бесконечности, которые определяют изменение потенциала у поверхностей раздела сред с разным удельным сопротивлением, а также вблизи и на большом удалении от источников.

Г р а н и ч н ы е у с л о в и я выражаются двумя требованиями.

Во-первых, потенциалы в точках, бесконечно близко расположенных к поверхности раздела двух сред, но по обе стороны от этой поверхности, должны быть равны, т. е.

$$U_1 = U_2. \quad (\text{II.10})$$

Иначе говоря, потенциальная функция на поверхности раздела не терпит разрыва. Это условие справедливо при отсутствии контактных э. д. с. на поверхностях раздела.

Во-вторых, должна соблюдаться непрерывность нормальной составляющей вектора плотности тока \mathbf{j}_n при переходе из одной среды в другую: $\mathbf{j}_n^{(1)} = \mathbf{j}_n^{(2)}$.

В соответствии с законом Ома

$$\mathbf{j}_n = -\frac{1}{\rho} E_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial n},$$

где $\partial U/\partial n$ — производная по направлению нормали.

Тогда второе граничное условие можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n}. \quad (\text{II.11})$$

Условие у источника тока заключается в том, что поле в точках, расположенных бесконечно близко к этому источнику, совпадает с полем в однородной среде. В частном случае точечного источника потенциал вблизи него равен $\frac{I\rho}{4\pi} \frac{1}{r}$, т. е. при $r \rightarrow 0$ $U \rightarrow \infty$ как $1/r$.

Условие на бесконечности означает, что потенциал источника с возрастанием r стремится к нулю.

На этих положениях основан метод зеркальных изображений. Сущность его заключается в том, что при расчете поля точечного источника в случае наличия поверхностей раздела сред с различным удельным сопротивлением искажающее влияние этих поверхностей заменяется влиянием добавочных (фиктивных) точечных источников поля, помещенных в однородную среду. Сила этих фиктивных источников, а также их расположение подбираются такими, чтобы удовлетворялись условия на поверхностях раздела сред с различным сопротивлением.

Таким образом, поле точечного источника в неоднородной среде рассчитывают как поле в однородной среде, но от совокупности действительного и фиктивных источников. Последние помещают в точках зеркального изображения действительного источника в поверхностях раздела.

Рассмотрим несколько примеров расчета полей в неоднородных средах при помощи метода зеркальных изображений.

Поле точечного источника при наличии в разрезе плоской поверхности раздела сред. Пусть источник тока I помещен в точке A среды с удельным сопротивлением ρ_1 (рис. 13). Для учета влияния плоской поверхности раздела сред с удельным сопротивлением ρ_2 и ρ_1 поместим в точку A' , являющуюся зеркальным изображением точки A , фиктивный источник тока I' . Поле в среде с удельным сопротивлением ρ_1 будем рассчитывать как поле обоих источников в безгранично однородной среде с удельным сопротивлением ρ_1 :

$$U_1 = I\rho_1/4\pi r + I'\rho_1/4\pi r', \quad (\text{II.12})$$

где r и r' — расстояния от точки M , в которой определяется поле, до точек A и A' .

Потенциал U_2 в точках среды с удельным сопротивлением ρ_2 будем рассчитывать как поле источника тока I'' , расположенного в точке A , причем вся среда считается однородной и обладает удельным сопротивлением ρ_2 :

$$U_2 = I''\rho_2/4\pi r''; \quad (\text{II.13})$$

здесь r'' — расстояние от точки M' до точки A .

Токи I' и I'' следует подбирать такими, чтобы влияние плоской границы двух сред было эквивалентно влиянию фиктивных точечных источников тока. Для этого должны выполняться граничные

условия, а именно — при расположении точек M и M' на поверхности раздела должны соблюдаться равенства

$$U_1 = U_2 \text{ и } \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n}.$$

Подставим в эти уравнения выражения (II.12) и (II.13). При этом примем во внимание, что при совмещении точек M и M' $x = d$ и $r = r' = r'' = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$. Кроме того, направление нормали к поверхности раздела совпадает с направлением оси x , поэтому для определения нормальной составляющей плотности тока нужно продифференцировать потенциальную функцию по x , т. е.

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{I\rho}{4\pi r} \right) = -\frac{I\rho}{4\pi} \frac{x}{r^3} = -\frac{I\rho}{4\pi} \frac{d}{r^3}.$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} I\rho_1/4\pi r + I'\rho_1/4\pi r^2 &= I''\rho_2/4\pi r'', \\ -\frac{1}{\rho_1} \frac{I\rho_1}{4\pi} \frac{d}{r^3} + \frac{1}{\rho_1} \frac{I'\rho_1}{4\pi} \frac{d}{(r')^3} &= -\frac{1}{\rho_2} \frac{I''\rho_2}{4\pi} \frac{d}{(r'')^3} \end{aligned}$$

или с учетом изложенного выше

$$\begin{aligned} I\rho_1/4\pi r + I'\rho_1/4\pi r &= I''\rho_2/4\pi r, \\ -\frac{1}{\rho_1} \frac{I\rho_1}{4\pi} \frac{d}{r^3} + \frac{1}{\rho_1} \frac{I'\rho_1}{4\pi} \frac{d}{r^3} &= -\frac{1}{\rho_2} \frac{I''\rho_2}{4\pi} \frac{d}{r^3}; \end{aligned}$$

здесь знак минус у второго члена меняется на плюс, так как r' имеет направление, противоположное направлению оси x .

После упрощения получаем уравнения

$$\begin{aligned} I\rho_1 + I'\rho_1 &= I''\rho_2, \\ -I + I' &= -I''. \end{aligned}$$

Решая эти уравнения относительно неизвестных I' и I'' , находим:

$$I' = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1) I = k_{12} I, \quad (\text{II.14})$$

$$I'' = 2\rho_1 I/(\rho_2 + \rho_1) = (1 - k_{12}) I, \quad (\text{II.15})$$

где

$$k_{12} = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1).$$

Безразмерный коэффициент k называется коэффициентом отражения. Это название не совсем удачно, так как не отвечает сущности явлений у поверхностей раздела, поскольку токовые линии не отражаются от этих поверхностей, а только преломляются.

Цифровой индекс у коэффициента k_{12} соответствует индексам контактирующих сред. Величина k_{12} при любых значениях ρ_1 и ρ_2 меняется в пределах от $+1$ до -1 , т. е. по абсолютной величине не превышает единицы.

Теперь мы можем написать выражения для потенциалов U_1 и U_2 и получить искомое решение задачи:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{k_{12}}{r'} \right), \quad (\text{II.16})$$

$$U_2 = \frac{I\rho_2}{4\pi} \frac{(1-k_{12})}{r''}. \quad (\text{II.17})$$

Смысл полученного решения уясним на примере поля точечного источника, расположенного в среде с удельным сопротивлением ρ_1 вблизи контакта со средой с бесконечно высоким сопротивлением $\rho_2 = \infty$. В этом случае $k_{12} = 1$, т. е. фиктивный источник имеет ту же силу, что и действительный. Если точка наблюдения отстоит от действительного источника на расстоянии, значительно большем, чем расстояние между этим источником и контактом, или если источник поля расположен на контакте, то $r \rightarrow r'$ и поле U_1 в точке наблюдения согласно выражению (II.16) удваивается. Во второй среде потенциал U_2 будет равен нулю, т. е. ток в среду бесконечно высокого сопротивления не потечет.

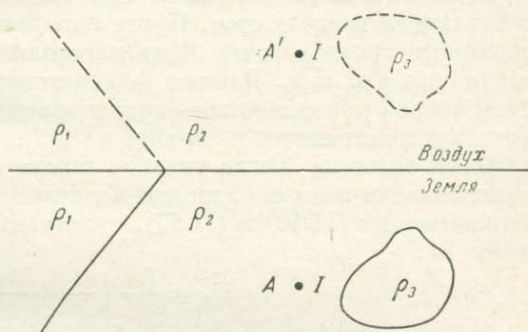


Рис. 14. Учет влияния границы земля — воздух.

Влияние поверхности земля — воздух. Характерной особенностью электроразведки является то, что изучаемое ею пространство ограничено поверхностью раздела земля — воздух, причем одна из контактирующих сред (воздух) практически не проводит электрический ток. Рельеф этой поверхности существенно сказывается на результатах полевых наблюдений. Но при решении теоретических задач с целью упрощения форма поверхности раздела земля — воздух обычно принимается плоской.

Предположим, что под плоской поверхностью воздух — земля расположен источник, питаемый током I (рис. 14). Поле этого источника при любом строении геоэлектрического разреза будет иметь ту характерную особенность, что у дневной поверхности нормальная к ней компонента вектора плотности тока \mathbf{j}_n равна нулю. Физически это означает, что ток из проводника (земля) в изолятор (воздух) не течет. Отмеченная особенность поля позволяет применить метод зеркальных изображений для учета влияния поверхности раздела воздух — земля. Отразим нижнее полупространство со всеми его неоднородностями и источником поля в поверхности раздела земля — воздух и предположим, что эта поверхность отсутствует. Тогда

в образовавшейся безграничной неоднородной среде в силу ее симметрии относительно плоскости земля — воздух нормальная компонента поля в точках этой плоскости по-прежнему будет равна нулю. Вследствие этого и во всех точках нижнего полупространства поле сохранится таким же, каким оно было ранее. Таким образом, задача расчета поля в проводящем полупространстве свелась к решению задачи в полном пространстве, в котором поверхность раздела воздух — земля отсутствует.

В том частном случае, когда источник расположен на поверхности земли, его отражение совпадает с самим источником, и для учета влияния поверхности раздела земля — воздух силу тока, питающего источник, удваивают.

Поле точечного источника при наличии в разрезе вертикальной поверхности раздела сред. Пусть источник тока I расположен на поверхности земли в точке A на расстоянии d от вертикального контакта сред с ρ_1 и ρ_2 . Данная задача отличается от предыдущей наличием второй поверхности — границы земля — воздух. Отразим нижнее полупространство в верхнее в этой поверхности и таким образом учтем ее влияние. Тогда условие задачи сведется к условиям предыдущей задачи и мы сможем для подсчета потенциала воспользоваться выражениями (II.16) и (II.17), подставив в них вместо тока I величину $2I$:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{k_{12}}{r'} \right), \quad (\text{II.18})$$

$$U_2 = \frac{I\rho_2}{2\pi} \frac{(1-k_{12})}{r''}. \quad (\text{II.19})$$

Расчетные формулы упрощаются, если профиль наблюдений провести через источник поля A перпендикулярно к линии контакта сред (рис. 15). Поместив начало координат в точку A и направив ось x по линии профиля, получим:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left(\frac{1}{x} + \frac{k_{12}}{(2d-x)} \right), \quad (\text{II.20})$$

$$U_2 = \frac{I\rho_2}{2\pi} \frac{(1-k_{12})}{x}. \quad (\text{II.21})$$

Найдем также выражения для напряженности поля:

$$E_1 = - \frac{\partial U_1}{\partial x} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{x^2} - \frac{k_{12}}{(2d-x)^2} \right], \quad (\text{II.22})$$

$$E_2 = - \frac{\partial U_2}{\partial x} = \frac{I\rho_2}{2\pi} \frac{(1-k_{12})}{x^2}. \quad (\text{II.23})$$

Формулы (II.20) и (II.22) позволяют рассчитывать поле в среде с ρ_1 , а формулы (II.21) и (II.23) — в среде с ρ_2 .

На основе общего решения задачи можно графически изобразить электрическое поле точечного источника, расположенного у поверхности раздела двух сред. На рис. 16 представлено поле для двух случаев: $\rho_2 < \rho_1$ и $\rho_2 > \rho_1$.

Токовые линии на границе преломляются, причем для каждой линии соблюдается следующее условие:

$$\rho_1/\rho_2 = \operatorname{tg} \alpha_2/\operatorname{tg} \alpha_1,$$

где α_1 и α_2 — углы между направлением токовой линии и нормалью к границе в точке их преломления.

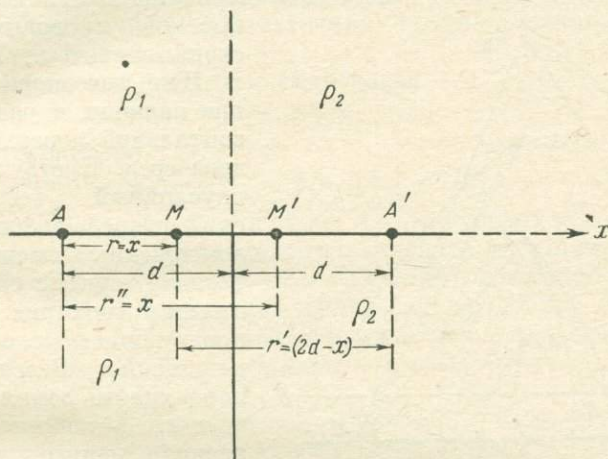


Рис. 15. Пояснение к расчету поля точечного источника тока, расположенного у поверхности Земли при наличии в разрезе вертикальной поверхности раздела.

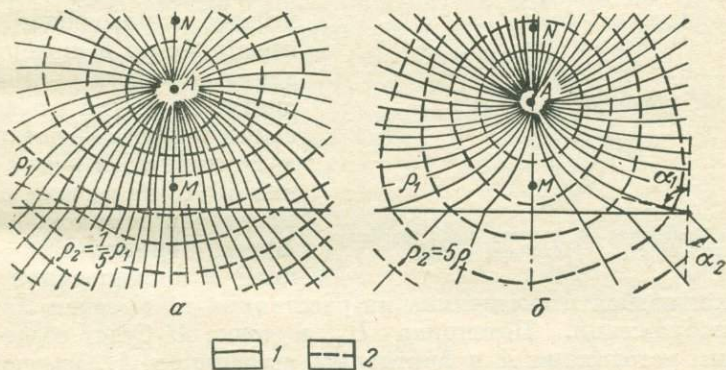


Рис. 16. Электрическое поле точечного источника, расположенного у поверхности раздела сред с различным удельным сопротивлением.

α — $\rho_2 = \rho_1/5$; β — $\rho_2 = 5\rho_1$; линии: 1 — токовые, 2 — эквипотенциальные.

Соответственно искажению токовых линий меняется форма эквипотенциальных поверхностей. В частности, токовые линии отклоняются средой более высокого сопротивления и как бы втягиваются средой пониженного сопротивления, поэтому в первом случае

в верхней среде плотность тока возрастает (а с ней возрастает и разность потенциалов между точками M и N), во втором случае — уменьшается (соответственно уменьшается и разность потенциалов между точками M и N).

Следует обратить внимание на то, что ток вследствие преломления токовых линий в плохо проводящем пласте стремится течь поперек пласта; переходя из плохо проводящего пласта в пласт высокой проводимости, он стремится течь вдоль пласта.

Поле точечного источника при наличии в разрезе горизонтальной поверхности раздела сред. Пусть мы имеем двуслойный геоэлектрический разрез с одной горизонтальной поверхностью раздела сред с сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 (рис. 17). Мощность первого слоя примем равной h_1 . Рассчитаем на поверхности земли поле точечного источника тока I , расположенного также на дневной поверхности в точке A .

Прежде всего отразим нижнее проводящее полупространство в поверхности земля — воздух. Получим среду с двумя поверхностями раздела — истинной I и фиктивной II — и с источником A , питающим полное пространство током силой $2I$. Будем определять потенциал в произвольной точке

Рис. 17. Пояснение к расчету поля точечного источника в двуслойной среде.

M , находящейся от источника на расстоянии r , методом зеркальных изображений. Потенциал U_1 в точке M будет создаваться точечным источником A и фиктивным источником A_I , являющимся зеркальным отражением источника A в границе I .

Согласно формуле (II.14) источник A_I должен отдавать в среду ток

$$I_I = 2Ik_{12},$$

поэтому в соответствии с формулами (II.12) и (II.16)

$$U_1 = \frac{2I\rho_1}{4\pi r} + \frac{I\rho_1}{4\pi r'} = \frac{I\rho_1}{2\pi r} + \frac{Ik_{12}\rho_1}{2\pi r'} = \frac{I\rho_1}{2\pi r} + \frac{Ik_{12}\rho_1}{2\pi \sqrt{r^2 + (2h_1)^2}}.$$

Этим самым мы соблюли условия на границе *I*. Однако необходимо выполнить также условия на границе *II*. Для этого нужно отразить в ней не только источник *A*, но и источник *A_I* (на рис. 17 эта операция отражения — вторая по счету — показана дугообразными стрелками 2). Источник *A* своим зеркальным изображением создаст фиктивный источник *A_{II}*, расположенный от точки *M* на расстоянии *r_{II}* и от поверхности наблюдения на расстоянии *2h₁*; в точке зеркального изображения фиктивного источника *A_I* появится еще один фиктивный источник *A_{III}* на расстояниях *r_{III}* от точки *M* и *4h₁* от точки *A*.

Ток источника *A_{II}* должен быть равен

$$I_{II} = 2Ik_{12},$$

а ток источника *A_{III}*

$$I_{III} = I_1 k_{12} = (2Ik_{12})k_{12} = 2Ik_{12}^2.$$

Но появившиеся источники *A_{II}* и *A_{III}* нарушают условия на границе *I*. Для их соблюдения придется отразить источники *A_{II}* и *A_{III}* в границе *I* (на рис. 17 — третья операция отражения обозначена стрелками 3); получим еще два фиктивных источника *A_{IV}* и *A_V* на расстояниях от точки *M* и поверхности наблюдения соответственно *r_{IV}*, *4h₁* и *r_V*, *6h₁*. Токи источников *A_{IV}* и *A_V* будут

$$I_{IV} = I_{II} k_{12} = (2Ik_{12})k_{12} = 2Ik_{12}^2,$$

$$I_V = I_{III} k_{12} = (2Ik_{12}^2)k_{12} = 2Ik_{12}^3.$$

Однако теперь нарушены условия на границе *II*. Операцией отражения 4 (рис. 17) они восстанавливаются (источники *A_{VI}* и *A_{VII}*), но одновременно снова нарушаются условия на границе *I*. Проведем пятую операцию отражения и т. д. Эти операции, очевидно, следует продолжать до бесконечности.

Таким образом, искомый потенциал *U₁* в точке *M* будет представлять бесконечную сумму потенциалов, создаваемых действительным источником *A* и фиктивными источниками *A_I*, *A_{II}*, *A_{III}*, ..., *A_n*:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{2\pi r} + \frac{Ik_{12}\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(2h_1)^2}} + \frac{Ik_{12}\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(2h_1)^2}} + \frac{Ik_{12}^2\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(2\cdot 2h_1)^2}} +$$

$$+ \frac{Ik_{12}^2\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(2\cdot 2h_1)^2}} + \frac{Ik_{12}^3\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(3\cdot 2h_1)^2}} + \frac{Ik_{12}^3\rho_1}{2\pi\sqrt{r^2+(3\cdot 2h_1)^2}} + \dots$$

$$\dots = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{\sqrt{r^2+(2nh_1)^2}} \right]. \quad (\text{II.24})$$

Получим выражение для напряженности поля, для чего продифференцируем почленно выражение (II.24) по *r*:

$$E_1 = -\frac{\partial U_1}{\partial r} = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n r}{[r^2+(2nh_1)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (\text{II.25})$$

Выражения, стоящие в формулах (II.24) и (II.25) под знаком суммы, представляют убывающие ряды, каждый член которых является правильной дробью. Такие ряды относятся к сходящимся, и по ним можно проводить расчеты с заданной точностью, ограничиваясь соответствующим числом членов ряда.

Аналогичным путем можно решить задачу для разреза с двумя горизонтальными поверхностями раздела. Получаемые при этом выражения для потенциала и напряженности поля также имеют вид сходящихся рядов, в целом аналогичных формулам (II.24) и (II.25), но имеющих под знаком суммирования более сложные постоянные множители, зависящие от коэффициентов отражения k_{12} и k_{23} и мощностей слоев.

Поле точечного источника в однородной анизотропной среде. Однородные и неоднородные среды, в которых мы рассматривали электрические поля, подразумевались изотропными. Однако, как указывалось в гл. I, горные породы часто обладают микроанизотропией.

Влияние микроанизотропии пород на электрические поля оценим на примере поля точечного источника. Выше было показано, что в однородной среде это поле характеризуется центральной (сферической) симметрией, т. е. токовые линии радиально и равномерно расходятся во все стороны из точки расположения источника, эквипотенциальные поверхности являются семейством концентрических окружностей (см. рис. 5). В прямоугольной системе координат x, y, z с началом в точке расположения источника эти особенности поля могут быть выражены следующими соотношениями:

$$j_x/x = j_y/y = j_z/z, \quad E_x/x = E_y/y = E_z/z.$$

В однородной безграничной анизотропной среде поле точечного источника по сравнению с полем в изотропной среде деформируется. Характер этой деформации можно видеть на рис. 18, на котором анизотропная среда представлена в виде параллельно переслаивающихся слоев с сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 . Токовые линии 1 и 2 точечного источника А, находящегося в слое с сопротивлением ρ_2

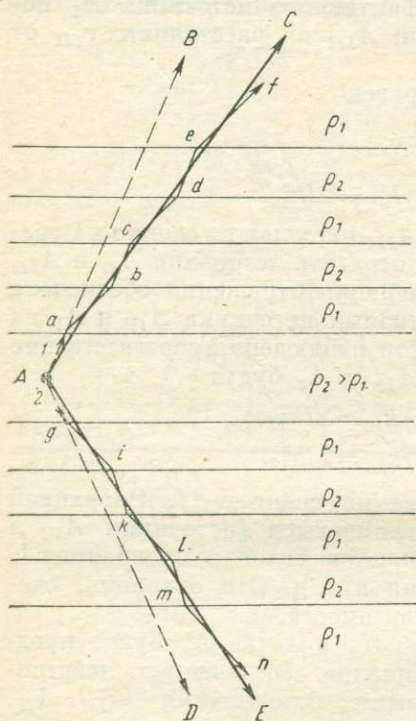


Рис. 18. Влияние анизотропии на токовые линии.

(ограничимся рассмотрением только двух линий), в случае безграничного слоя шли бы в направлениях AB и AD . В анизотропной же среде токовые линии преломляются на поверхностях раздела слоев и превращаются в ломаные линии $Aabc \dots f$ и $Agi \dots n$.

В микроанизотропной среде отрезки Aa , ab и другие настолько малы, что практически ломаные токовые линии могут быть заменены осредняющими прямыми AC и AE . Но, как видно на рис. 18, эти прямые отклонились от прямых AB и AD в направлении сланцеватости анизотропной среды.

Таким образом, токовые линии, сохраняя свою прямолинейность и радиальность, распределяются в анизотропном пространстве

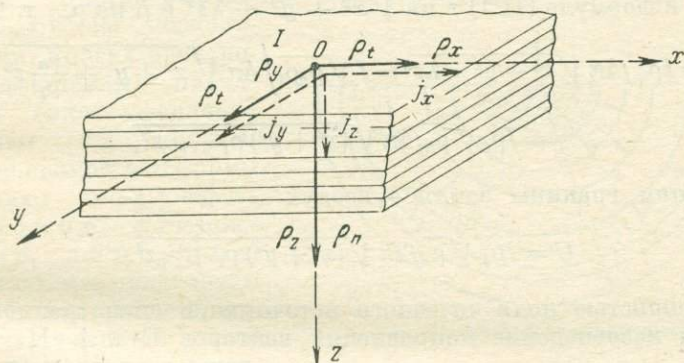


Рис. 19. Пояснение к расчету поля точечного источника в анизотропной среде.

вокруг источника неравномерно — большая часть тока растекается по сланцеватости (или в общем случае — в направлении, в котором анизотропная среда имеет меньшее удельное сопротивление ρ_t). Вследствие этого распределение потенциала поля точечного источника становится более сложным.

Поместим точечный источник тока силой I в точку O однородной анизотропной среды (рис. 19). Оси x и y расположим в плоскости сланцеватости, а ось z направим по нормали к этой плоскости. Тогда $\rho_x = \rho_y = \rho_t$, $\rho_z = \rho_n$.

Так как $\rho_n > \rho_t$, то $j_x = j_y > j_z$, и, следовательно, напряженность поля по направлению осей x и y будет больше, чем вдоль оси z . В связи с этим эквипотенциальные поверхности вытянуты в направлении сланцеватости и представляют собой эллипсоиды вращения относительно оси z . Сечения эквипотенциальных поверхностей координатными поверхностями xOz и yOz являются эллипсами с большими полуосями, совпадающими с направлением осей x и y . Сечение в плоскости xOy — окружность.

Таким образом, в анизотропной среде поле по сравнению с полем в однородной изотропной среде «вытянуто» вдоль осей x и y (или «сжато» по оси z).

Вывод выражения для потенциала поля в анизотропной среде сложен, и мы его проведем с некоторыми упрощающими допущениями. Если изменить масштаб изображения поля, сжав его по осям x и y или вытянув вдоль оси z , и при этом коэффициент микроанизотропии λ_μ рассматривать как своеобразный коэффициент искажения изотропности среды, то таким искусственным приемом можно полю в анизотропной среде придать вид, характерный для изотропной среды, и пользоваться уже известным выражением для потенциала. Но при этом надо полагать, что среда обладает некоторым средним удельным сопротивлением $\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t}$.

Выражение для U в такой трансформированной среде получим, заменив в формуле (II.1) r на $\sqrt{x^2 + y^2 + \lambda z^2}$ и ρ на ρ_m , т. е.

$$U = I \rho_m / 4\pi \sqrt{x^2 + y^2 + \lambda z^2} = I \sqrt{\rho_n \rho_t} / 4\pi \sqrt{x^2 + y^2 + \frac{\rho_n}{\rho_t} z^2} = I \rho_t \sqrt{\rho_n / 4\pi \sqrt{(x^2 + y^2) \rho_t + \rho_n z^2}}$$

а с учетом границы земля — воздух

$$U = I \rho_t \sqrt{\rho_n / 2\pi \sqrt{(x^2 + y^2) \rho_t + \rho_n z^2}} \quad (\text{II.26})$$

Особенностью поля точечного источника в анизотропной среде является несовпадение направлений векторов \mathbf{E} и \mathbf{j} . На рис. 20

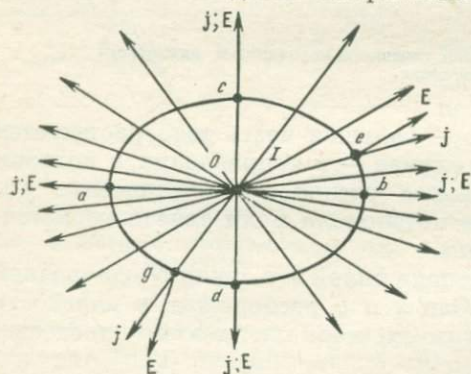


Рис. 20. Векторы \mathbf{j} и \mathbf{E} электрического поля точечного источника в анизотропной однородной среде.

показана одна эквипотенциальная линия поля источника I , расположенного в анизотропной среде в точке O . Во всех точках эквипотенциальной линии направление токовых линий определяется направлением вектора \mathbf{j} , а вектор \mathbf{E} направлен по нормали (как, например, в точках e и g) к эквипотенциальной линии. Лишь в точках a , b , c и d векторы \mathbf{E} и \mathbf{j} совпадают.

Таким образом, микроанизотропия пород усложняет картину наблюдаемых полей, затрудняя тем самым истолкование результатов электроразведочных наблюдений. Недоучет микроанизотропии в ряде случаев приводит к значительным ошибкам. Однако микроанизотропия отражает текстурные особенности пород и на ней, как на физико-геологическом явлении, основываются некоторые частные методы электроразведки (круговое профилирование, круговое вертикальное электрическое зондирование).

§ 3. ЗАЗЕМЛЕНИЯ

В методах электроразведки постоянными полями, а также в некоторых методах электроразведки переменными полями источниками электромагнитных полей служат заземления, присоединенные к полюсам источника тока.

Заземления являются также необходимым элементом измерительной цепи в тех методах электроразведки, в которых исследуется разность потенциалов между различными точками земли. Заземления выполняются из одного или нескольких электродов, погруженных в землю.

Заземление, состоящее из одного электрода, называют простым. Иногда заземление для уменьшения его сопротивления устраивают из нескольких или многих электродов, соединенных параллельно. Такое заземление называют сложным.

В зависимости от формы различают полусферические, стержневые, линейные, дисковые электроды и др. В настоящее время в электроразведке чаще всего применяют стержневые электроды; иногда используют линейные электроды.

Конструкция заземления (форма электродов, их размеры, число электродов и др.) играет большую роль при электроразведочных работах, так как она определяет силу тока, посылаемого в землю через питающие электроды, и, следовательно, интенсивность создаваемых полей. Кроме того, качество заземлений оказывает влияние на чувствительность измерительных устройств, а также на точность полевых измерений.

Знакомство с расчетом заземлений удобнее начать с простейшего, полусферического, электрода.

Полусферический электрод. Представляет собой металлическую полусферу, погруженную в землю так, как это показано на рис. 21.

Если геологический разрез однороден в электрическом отношении, то ток, подведенный к такому электроду, растекается в земле по радиальным направлениям. Найдем выражение для потенциала поля, создаваемого полусферическим электродом в однородном полупространстве.

Поскольку электрод изготовлен из металла, удельное сопротивление которого весьма мало по сравнению с удельным сопротивлением окружающей среды, падением потенциала в пределах самого электрода можно пренебречь и считать, что все точки электрода имеют один и тот же потенциал.

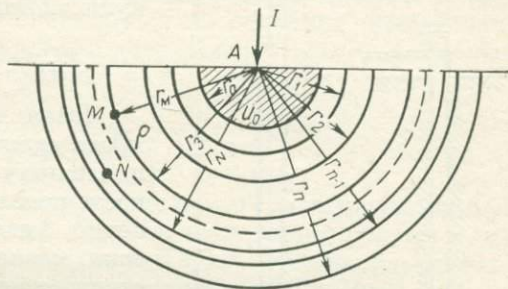


Рис. 21. Полусферический электрод.

Пусть удельное сопротивление среды ρ , радиус электрода r_0 и потенциал его U_0 . Проведем систему концентрических полусфер с радиусами, отличающимися один от другого на Δr , т. е. $r_1 = r_0 + \Delta r$, $r_2 = r_1 + \Delta r$, $r_3 = r_2 + \Delta r$, ..., $r_n = r_{n-1} + \Delta r$.

Как было показано при выводе формулы для потенциала точечного источника поля, разность потенциалов между поверхностью электрода и полусферой с радиусом r_n определяется следующим выражением:

$$U_{r_0} - U_{r_n} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_n} \right).$$

Если величину r_n взять бесконечно большой, то потенциал U_{r_n} будет равен нулю, и тогда

$$U_{r_0} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_0} \quad \text{или} \quad \frac{U_{r_0}}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0}.$$

Левая часть последнего равенства представляет собой отношение потенциала полусферического электрода (разность потенциалов между ним и бесконечно удаленными точками) к силе тока, стекающего с него. В соответствии с принятой в электротехнике терминологией эту величину называют сопротивлением безграничной среды току, стекающему с полусферического

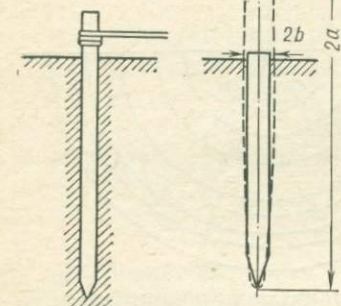


Рис. 22. Стержневой электрод.

электрода, или просто сопротивлением полусферического электрода. Обозначив эту величину через R_3 , можно написать:

$$R_3 = \rho / 2\pi r_0. \quad (\text{II.27})$$

Стержневой электрод. Представляет собой металлический колышек (пикет) или щуп, забиваемый в землю на различную глубину (рис. 22). Этот электрод наиболее часто применяют в электроразведке. Сопротивление R_3 такого электрода можно подсчитать по следующей приближенной формуле:

$$R_3 \approx \frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{2a}{b}, \quad (\text{II.28})$$

где a — длина забитой в землю части электрода; b — его радиус. Пользуясь десятичным логарифмом, можно написать

$$R_3 = 0,367 \frac{\rho}{a} \lg \frac{2a}{b}.$$

Приведенные выше выражения для сопротивления сферического и стержневого электродов справедливы лишь при условии идеального контакта между металлом, из которого изготовлен электрод,

и средой, в которую он помещен. Практически электрод, забитый в землю, контактирует с ней не по всей своей поверхности, причем в жестких каменных, песчаных и щебенистых породах этот контакт значительно хуже, чем в пластичных, тонкодисперсных породах. Вследствие этого, рекомендуется при расчете сопротивления заземления по выражениям (II.27) и (II.28) вводить поправочный множитель, равный единице для таких пластичных пород, как глины, очень влажные суглинки, болотистые почвы, и нескольким единицам для песчаных и щебенистых пород.

Сопротивление электрода любой формы может быть уменьшено различными приемами. Из выражений (II.27) и (II.28) следует, что увеличение размеров электрода ведет к уменьшению его сопротивления. Необходимо отметить, что изменение радиуса и длины стержневого электрода по-разному сказывается на величине сопротивления. Выражение для сопротивления стержневого электрода может быть записано следующим образом:

$$R_{\text{э}} = 0,367 \frac{\rho}{a} (\lg 2a - \lg b).$$

Поскольку на практике обычно используют электроды, длина которых в 50—100 раз больше их радиуса, роль второго члена в выражении для $R_{\text{э}}$ оказывается небольшой. Таким образом, для уменьшения сопротивления стержневого электрода необходимо прежде всего увеличить длину забитой в землю части электрода.

Из приведенных выше выражений для сопротивления сферического и стержневого электродов, а также из аналогичных выражений для электродов другой формы следует, что сопротивление заземлений возрастает пропорционально сопротивлению той среды, в которую забит электрод. При выполнении электроразведочных работ в районах с плохо проводящим поверхностным слоем (сухие пески, галечники, осыпи и др.) сопротивление заземлений оказывается настолько большим, что затрудняет создание интенсивного электрического поля, а также его измерение. В этом случае для уменьшения сопротивления заземлений питающей и приемной цепей поверхностный слой земли вокруг электродов увлажняют и тем самым уменьшают его сопротивление и соответственно сопротивление электродов, из которых устроено заземление.

Сложные заземления. С целью уменьшения сопротивления заземлений в электроразведке широко применяют сложные заземления, состоящие из нескольких электродов, соединенных параллельно.

В том случае, когда расстояние между отдельными электродами в сложном заземлении велико по сравнению с размерами погруженной в землю части электродов, сопротивление сложного заземления можно вычислить, пользуясь обычными формулами для параллельно соединенных сопротивлений:

$$\frac{1}{R_{\text{заз}}} = \frac{1}{R_{\text{э}_1}} + \frac{1}{R_{\text{э}_2}} + \frac{1}{R_{\text{э}_3}} + \dots + \frac{1}{R_{\text{э}_n}},$$

где $R_{\text{ззз}}$ — суммарное сопротивление сложного заземления; $R_{\text{э}_1}$, $R_{\text{э}_2}$, $R_{\text{э}_3}$, . . . , $R_{\text{э}_n}$ — сопротивления отдельных электродов.

В частном, но весьма распространенном случае сложного заземления, состоящего из n одинаковых электродов с сопротивлением $R_{\text{э}}$,

$$1/R_{\text{ззз}} = n/R_{\text{э}} \text{ или } R_{\text{ззз}} = R_{\text{э}}/n.$$

При уменьшении расстояния между электродами начинает сказываться их взаимное влияние, которое заключается в том, что все электроды сложного заземления создают дополнительный потенциал в точке расположения каждого электрода этого заземления. Выше указывалось, что сопротивление электрода прямо пропорционально его потенциалу. Следовательно, в результате влияния соседних электродов сопротивление каждого электрода, входящего в сложное заземление, возрастет по сравнению с сопротивлением такого же, но единичного электрода.

Для уменьшения сопротивления сложного заземления нужно электроды забивать на возможно большем расстоянии друг от друга. Практически это расстояние должно быть не меньше 3—4-кратной длины погруженной в землю части стержневых электродов. Увеличивая расстояние между электродами в сложном заземлении, следует помнить: для того, чтобы это заземление считалось точечным, общий размер заземления должен быть намного меньше, чем расстояние от него до точек, в которых исследуется поле (до измерительных электродов).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

§ 1. КАЖУЩЕЕСЯ УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

При работе методом сопротивлений электрическое поле создают двумя точечными заземлениями A и B . Через эти заземления, называемые питающими, в землю вводят электрический ток силой I от какого-либо источника постоянного тока, например от батареи сухих элементов, машинного генератора постоянного тока и др. Между двумя точками земли при помощи измерительных заземлений M и N , помещенных в эти точки, и соответствующего измерительного прибора измеряют возникающую разность потенциалов ΔU . Взаимное расположение заземлений A, B, M и N , образующих четырехточечную установку, определяется характером решаемых геологических задач.

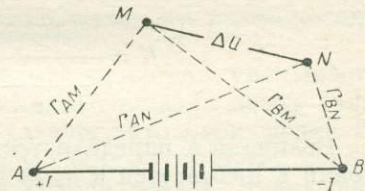


Рис. 23. Четырехточечная установка для работы методом сопротивлений.

Наиболее общий вид четырехточечной установки (с произвольным расположением питающих и приемных заземлений) изображен на рис. 23.

Найдем разность потенциалов между заземлениями M и N , расположенными на плоской дневной поверхности однородного полупространства, заполненного средой с удельным сопротивлением ρ .

Заземления A и B создают в точке M , отстоящей от них на расстояниях r_{AM} и r_{BM} , электрическое поле с потенциалами U_{MA} и U_{MB} , которые согласно выражению (II.1) имеют значения

$$U_{MA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}}, \quad U_{MB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}}.$$

Суммарный потенциал точки M

$$U_M = U_{MA} + U_{MB} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BM}} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right).$$

Аналогично потенциал точки N

$$U_{NA} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{AN}}, \quad U_{NB} = -\frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_{BN}},$$

$$U_N = U_{NA} + U_{NB} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right).$$

Разность потенциалов между точками M и N

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) =$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right).$$

Отсюда получаем следующее выражение для удельного сопротивления ρ однородной среды, на поверхности которой расположена четырехточечная установка:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}$$

или

$$\rho = K \Delta U / I, \quad (\text{III.1})$$

где

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}}. \quad (\text{III.2})$$

Величина K определяется расстояниями между электродами установки и называется коэффициентом установки. Согласно выражению (III.2) коэффициент установки имеет размерность длины.

Формулу (III.1), полученную для однородной среды, можно применить для обработки результатов измерений с четырехточечной установкой, расположенной на поверхности неоднородной среды, однако в этом случае в результате вычислений мы получим некоторую условную величину, имеющую лишь размерность удельного сопротивления. Эту условную величину принято называть кажущимся удельным электрическим сопротивлением¹ и обозначать ρ_k .

Таким образом, в общем случае

$$\rho_k = K \Delta U / I. \quad (\text{III.3})$$

В частном случае однородной среды кажущееся удельное сопротивление совпадает с истинным удельным сопротивлением $\rho_k = \rho$.

Из формулы (III.3) следует, что ρ_k не зависит от силы тока I , посылаемого в землю, так как изменение силы тока I вызывает про-

¹ Сокращенно кажущееся сопротивление.

порциональное изменение разности потенциалов ΔU . Величина кажущегося сопротивления зависит от строения геоэлектрического разреза, взаимного расположения заземлений в установке и ее положения на дневной поверхности. Убедимся в этом на следующих примерах. На рис. 24 изображена четырехточечная установка, расположенная над однородной средой (а), над средой, включающей в себя хорошо проводящее тело (б), и над средой, включающей плохо проводящее тело (в).

В случае однородной среды (рис. 24, а), как уже указывалось выше, кажущееся удельное сопротивление будет равно истинному удельному сопротивлению.

Во втором случае (рис. 24, б) ток концентрируется в проводящем теле, в результате чего плотность тока в той части вмещающей

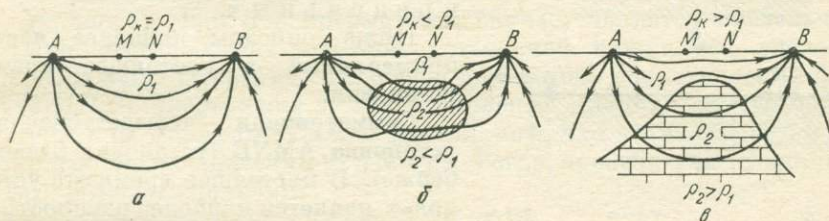


Рис. 24. Зависимость ρ_k от характера геоэлектрического разреза.

Среда: а — однородная, б — включающая хорошо проводящее тело, в — включающая плохо проводящее тело (известняки).

среды, в которую помещены измерительные заземления, уменьшается и вследствие этого уменьшается разность потенциалов между этими заземлениями. Из выражения (III.3) следует, что уменьшение ΔU ведет к уменьшению ρ_k . Таким образом, наличие в среде хорошо проводящего тела в данном случае обуславливает уменьшение ρ_k по сравнению с его значением в однородной среде.

В случае, изображенном на рис. 24, в, ток обтекает тело высокого сопротивления и сгущается в области измерительных заземлений. Это приводит к увеличению ΔU , а следовательно, и к увеличению ρ_k .

Кажущееся сопротивление не следует понимать как осредненное значение истинных сопротивлений пород, слагающих геологический разрез. Можно представить такие условия, при которых кажущееся сопротивление примет значения, выходящие за пределы изменения истинных удельных сопротивлений пород, участвующих в строении разреза.

На зависимости кажущегося сопротивления от строения геоэлектрического разреза основана возможность применения метода сопротивлений для геологических исследований.

§ 2. УСТАНОВКИ ДЛЯ РАБОТЫ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Установки для работы методом сопротивлений (т. е. совокупность питающих и измерительных заземлений) отличаются одна от другой числом заземлений и их взаимным расположением. Каждая

из установок предназначена для решения определенных геологических задач.

В зависимости от числа заземлений в установке различают четырехточечные, трехточечные и двухточечные установки.

Если все заземления установки расположены на одной прямой, установку называют прямой. Если отмеченное выше условие не выполняется, установка называется не прямой.

Установки, у которых измерительные заземления сближены настолько, что разность потенциалов между ними, отнесенная к расстоянию, практически равна напряженности поля, носят название предельных.

Ниже описаны наиболее часто применяемые в настоящее время установки.

Симметричная четырехточечная установка AMNB (установка Шлюмберже). В настоящее время эта установка является наиболее распространенной при работе методом сопротивлений. В ней приемные заземления расположены на прямой, соединяющей питающие заземления, симметрично относительно центра отрезка AB , т. е. эта установка относится к числу прямолинейных (рис. 25, *a*). Расстояние между приемными заземлениями r_{MN} должно быть меньше

Рис. 25. Установки для работы методом сопротивлений.

a — симметричная четырехточечная AMNB; *б* — трехточечная AMN, $B \rightarrow \infty$; *в* — двухточечная AM, $N \rightarrow \infty$, $B \rightarrow \infty$.

одной трети расстояния между питающими заземлениями r_{AB} . При этом условии отношение $\Delta U/r_{MN}$ можно с достаточной точностью считать равным напряженности поля в центре установки, т. е. считать ее предельной. Это облегчает сопоставление результатов полевых наблюдений с данными теоретических расчетов напряженности поля.

Для четырехточечной симметричной установки, как это видно на рис. 25, *a*, $r_{AM} = r_{BN}$, $r_{AN} = r_{BM}$ и согласно формуле (III.2)

$$K = \frac{2\pi}{\frac{2}{r_{AM}} - \frac{2}{r_{AN}}}$$

В более удобном для вычислений виде эту формулу можно переписать так:

$$K = \pi r_{AM} r_{AN} / r_{MN}. \quad (\text{III.4})$$

Симметричная четырехточечная установка, в которой $r_{AM} = r_{MN} = r_{NB}$, носит название установки Веннера.

Для этой установки

$$K = 2\pi a, \quad (\text{III.5})$$

где

$$a = r_{MN}.$$

Трехточечная прямолинейная установка $AMN, B \rightarrow \infty$. Отнесем одно из питающих заземлений (например, B) на такое расстояние, чтобы создаваемая им между приемными заземлениями разность потенциалов была мала по сравнению с разностью потенциалов, создаваемой вторым питающим заземлением. Тогда полем удаленного заземления можно пренебречь. Установка, в которой одно из питающих заземлений удалено на большое расстояние (отнесено в бесконечность), называется трехточечной (рис. 25, б).

Установка, как и в предыдущем случае, является предельной.

При работе с трехточечной установкой кажущееся удельное сопротивление вычисляются по общей для метода сопротивлений формуле (III.3). Выражение для коэффициента в данном случае можно получить из формулы (III.2) с учетом того, что величины r_{BM} и r_{BN} намного больше значений r_{AM} и r_{AN} . Тогда, пренебрегая величинами $1/r_{BM}$ и $1/r_{BN}$, получим:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}}} = 2\pi \frac{r_{AM}r_{AN}}{r_{MN}}. \quad (\text{III.6})$$

Для уменьшения длины проводов заземление B выгоднее относить в бесконечность по линии, проходящей через центр отрезка MN перпендикулярно к нему, так как в этом случае разность потенциалов между точками M и N , создаваемая заземлением B , в неоднородной среде будет меньше, чем в случае, если это заземление расположено на прямой, соединяющей точки M, N . В однородной среде при рекомендуемом положении заземления B разность потенциалов, создаваемая им, вследствие равенства r_{BM} и r_{BN} будет равна нулю.

Иногда, исходя из конкретных условий полевых работ, заземление B приходится относить в бесконечность по линии, совпадающей с прямой AB . В этом случае расстояние до заземления в бесконечности рекомендуется брать равным 10–15-кратному расстоянию между центром измерительной линии и электродами A или B .

Двухточечная установка $AM, N \rightarrow \infty$. Она отличается от трехточечной тем, что в ней одно из измерительных заземлений (в данном случае N) отнесено от обоих питающих и второго измерительного заземлений на расстояние, достаточно большое для того, чтобы потенциал его практически был равен нулю (рис. 25, в). Таким образом, измерив разность потенциалов между приемными заземлениями, мы фактически измерим потенциал U_M точки M , созданный питающим заземлением A . Величина ρ_k и в данном случае определяется из выражения (III.3).

Если в (III.2) принять r_{AN} , r_{BM} и r_{BN} бесконечно большими, можно получить следующую формулу для коэффициента двухточечной установки:

$$K = 2\pi\gamma_{AM}. \quad (\text{III.7})$$

Установка с вынесенными измерительными заземлениями. Эта установка относится к числу непрямолинейных предельных установок.



Рис. 26. Установка с вынесенными измерительными заземлениями.

Измерительные заземления в такой установке располагаются вдоль прямых, параллельных линии AB в пределах квадрата, сторона которого обычно не превышает $AB/3$ (рис. 26). На ограниченной таким образом площади нормальное поле заземлений A и B

практически однородно. Коэффициент установки с вынесенными измерительными заземлениями рассчитывается по общей формуле (III.2) или при помощи специальных номограмм.

Дипольные установки. Характерной особенностью дипольных установок является то, что в них приемные и питающие заземления

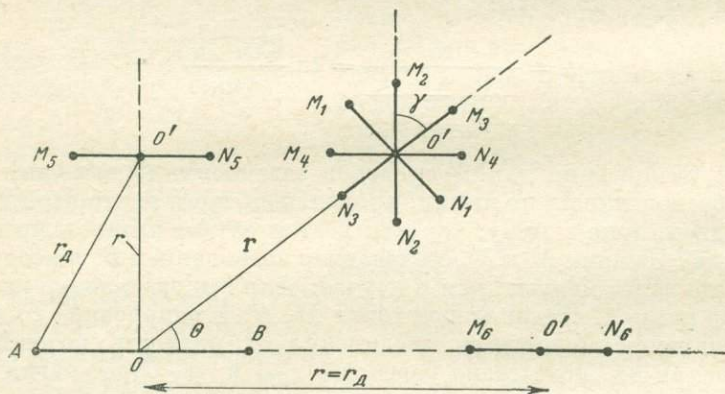


Рис. 27. Дипольные установки.

ABM_1N_1 — азимутальная ($\gamma = \pi/2$); ABM_2N_2 — перпендикулярная ($\gamma = \pi/2 - \theta$); ABM_3N_3 — радиальная ($\gamma = 0$); ABM_4N_4 — параллельная ($\gamma = -\theta$); ABM_5N_5 — экваториальная ($\theta = 90^\circ$); ABM_6N_6 — осевая ($\theta = 0$).

попарно сближены между собой настолько, что величины r_{AB} и r_{MN} намного меньше расстояния между центрами отрезков AB и MN .

В зависимости от взаимного расположения питающего и приемного диполей различают несколько типов дипольных установок. Классификацию их предложено (Л. М. Альпин) производить по величине угла γ между осью измерительного диполя и радиусом-вектором, проведенным из центра питающего диполя в центр приемного, а также по величине угла θ между осью питающего диполя и этим радиусом-вектором (рис. 27).

В зависимости от угла γ различают следующие наиболее часто применяемые установки:

1) азимутальная установка — ось измерительного диполя перпендикулярна к радиусу-вектору \mathbf{r} , проведенному из центра питающего диполя в точку наблюдения ($\gamma = \pi/2$);

2) перпендикулярная установка — ось измерительного диполя перпендикулярна к оси питающего диполя ($\gamma = \pi/2 - \theta$);

3) радиальная установка — ось измерительного диполя совпадает с направлением радиуса-вектора \mathbf{r} ($\gamma = 0$);

4) параллельная установка — оси обоих диполей параллельны ($\gamma = -\theta$).

По величине угла θ дипольные установки подразделяются на дипольно-осевые ($\theta = 0$), дипольно-экваториальные ($\theta = 90^\circ$) и установки с произвольным значением θ .

Кажущееся удельное сопротивление при измерении дипольной установкой определяется по общей формуле (III.3).

Для вычисления коэффициента дипольной установки может быть использовано выражение (III.2). Преобразование этого выражения к виду, более удобному для вычисления, представляет некоторую сложность и здесь не приводится. В качестве примера укажем, что для дипольно-осевой установки

$$K = \frac{K_{\text{BMN}}K_{\text{AMN}}}{K_{\text{BMN}} - K_{\text{AMN}}}, \quad (\text{III.8})$$

где K_{BMN} и K_{AMN} — коэффициенты трехточечных установок с размерами, равными соответствующим размерам дипольной установки.

§ 3. ПРИНЦИП ВЗАИМНОСТИ

Представим две четырехточечные установки, отличающиеся одна от другой тем, что их питающие и приемные заземления переставлены местами. Обе установки помещены на плоской поверхности однородной среды с удельным сопротивлением ρ .

Коэффициенты K_1 и K_2 первой и второй установок согласно формуле (III.2) будут равны:

$$K_1 = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{\text{AM}}} - \frac{1}{r_{\text{BM}}} - \frac{1}{r_{\text{AN}}} + \frac{1}{r_{\text{BN}}}},$$

$$K_2 = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{\text{MA}}} - \frac{1}{r_{\text{NA}}} - \frac{1}{r_{\text{MB}}} + \frac{1}{r_{\text{NB}}}}.$$

Учитывая, что

$$r_{\text{AM}} = r_{\text{MA}}, \quad r_{\text{AN}} = r_{\text{NA}} \text{ и т. д.},$$

можно сделать заключение, что $K_1 = K_2$.

В однородной среде разность потенциалов между приемными заземлениями определяется для обеих установок выражениями

$$\Delta U_1 = \rho I_1 / K_1, \quad \Delta U_2 = \rho I_2 / K_2.$$

Если токи, протекающие в обеих установках, равны, т. е. $I_1 = I_2$, то равны и разности потенциалов ΔU_1 и ΔU_2 , а это означает, что при перестановке местами питающих и приемных заземлений измеряемая разность потенциалов не изменяется, если неизменной остается сила тока в цепи питающих заземлений.

Это положение можно доказать и для среды неоднородной и анизотропной. Не останавливаясь на доказательстве, посмотрим, как связаны между собой кажущиеся удельные сопротивления, измеренные установками, в которых питающие и приемные заземления взаимно заменены.

Очевидно, что для установки AMNB

$$\rho_{к_1} = K_1 \Delta U_1 / I_1;$$

для установки MABN

$$\rho_{к_2} = K_2 \Delta U_2 / I_2.$$

Так как $K_1 = K_2$, то при условии равенства токов I_1 и I_2 будет соблюдаться равенство $\Delta U_1 = \Delta U_2$.

Следовательно, $\rho_{к_1} = \rho_{к_2}$.

Таким образом, перестановка местами заземлений AB и MN не сказывается на величине измеряемого $\rho_{к}$. Но поскольку кажущееся удельное сопротивление не зависит от силы тока в цепи питающих заземлений измерительной установки, последнее равенство будет справедливо и для случая, когда $I_1 \neq I_2$.

Это положение известно в электроразведке под названием п р и н ц и п а в з а и м н о с т и.

§ 4. АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для производства полевых работ методом сопротивлений требуется прежде всего прибор, позволяющий измерять разность потенциалов между двумя точками на дневной поверхности и силу тока, посылаемого в землю через электроды A и B . Кроме того, необходимо иметь источники питания, провода и катушки для них, заземления, а также другое вспомогательное оборудование.

Применяемая аппаратура и оборудование должны удовлетворять требованиям, определяемым сложностью условий, в которых приходится проводить полевые работы. К этим требованиям относятся, в первую очередь, надежность в работе, повышенная прочность в сочетании с легкостью и портативностью, а также простота в обращении. Измерительные приборы должны обладать влаго- и пыленепроницаемостью.

Разность потенциалов обычно изменяется от десятых долей до нескольких сотен милливольт; сила тока — от единиц миллиампер

до единиц и реже десятков ампер. Относительная погрешность измерений разности потенциалов и силы тока не должна превышать 1,5—2,5%, что обеспечивает определение ρ_k с относительной погрешностью не свыше 5%.

При полевых работах методами постоянного тока помимо измеряемой разности потенциалов между электродами M и N действует разность потенциалов полей-помех. Первая из этих помех связана с явлением поляризации измерительных электродов. Металлический стержень, забиваемый в почву, соприкасается с растворами, находящимися в порах горных пород. В результате процессов, до некоторой степени аналогичных процессам, происходящим в гальванических элементах, стержень приобретает некоторый потенциал, отличный от потенциала почвы. Этот потенциал носит название электродного и зависит от металла электрода и от минерализации почвенных растворов. Величина электродного потенциала обычно непостоянна и со временем меняется, особенно для железных электродов. Другой источник помех — естественные электрические поля, происхождение которых будет рассмотрено в гл. V.

Помехами при измерении кажущегося сопротивления являются блуждающие токи, связанные с утечками тока из промышленных электрических установок, линий электропередач, рельсов электрофицированных железных дорог и др.

Для устранения описанных выше помех в измерительных приборах, предназначенных для работы методами постоянного тока, используется специальный блок — компенсатор поляризации.

Во всех приборах применяется общий принцип измерения силы тока, поступающего в землю. В питающую цепь последовательно включается эталонированное сопротивление R_3 . Согласно закону Ома, падение напряжения ΔU_3 на таком сопротивлении

$$\Delta U_3 = IR_3,$$

где I — сила тока в питающей цепи.

Следовательно, измерив падение напряжения на известном сопротивлении, можно вычислить силу тока по формуле

$$I = \Delta U_3 / R_3.$$

Величины ΔU_3 и ΔU_{MN} измеряют одним и тем же прибором. Описанный выше способ измерения силы тока выгоден прежде всего тем, что относительные погрешности в определении ΔU и I одинаковы и на отношении этих величин не сказываются. Кроме того, отпадает необходимость в применении специального прибора для измерения силы тока.

Ниже описываются принципиальные схемы измерительных приборов, применяемых при работе методом сопротивлений и некоторыми другими методами электроразведки постоянными полями.

Компенсационный способ измерения разности потенциалов

Сущность компенсационного способа измерения разности потенциалов заключается в сравнении подлежащей определению и эталонной разности потенциалов. Источником эталонной разности потенциалов обычно служит сухой элемент с потенциометрическим делителем напряжения.

Для того чтобы уяснить сущность компенсационного способа, обратимся к схеме, изображенной на рис. 28. Через проволочное сопротивление CD от элемента \mathcal{E} течет ток i в направлении, указанном на рисунке стрелкой. Точка m через гальванометр соединена с электродом M приемной цепи, а точка n — непосредственно с электродом N .

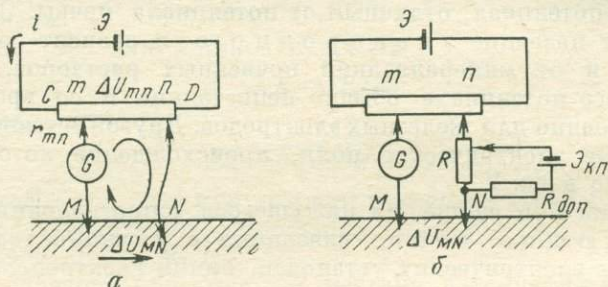


Рис. 28. Принципиальная схема установки для измерения компенсационным способом.

a — без компенсатора поляризации; b — с компенсатором поляризации.

тродом N . В образованном замкнутом контуре $MmnN$ действуют две разности потенциалов: измеряемая ΔU_{MN} , обусловленная электрическим полем в земле, и компенсирующая ΔU_{mn} , создаваемая падением напряжения компенсационного элемента на сопротивлении CD .

Суммарная разность потенциалов ΔU в контуре

$$\Delta U = \Delta U_{MN} + \Delta U_{mn}.$$

Для определения знака разности потенциалов следует какое-либо направление в контуре принять за положительное (на рис. 28, a за положительное взято направление по часовой стрелке) и считать эту разность положительной, если потенциал передней по ходу точки контура больше, чем потенциал задней точки. (Очевидно, при указанных на рис. 28 стрелками направлениях тока величина ΔU_{mn} отрицательна, а ΔU_{MN} положительна.)

Согласно закону Ома, ток в контуре $MmnN$ будет равен суммарной разности потенциалов, деленной на сопротивление контура. В этом случае, когда обе действующие в контуре разности потенциалов равны по абсолютной величине и обратны по знаку, т. е. когда $\Delta U_{MN} = -\Delta U_{mn}$, суммарная разность потенциалов в контуре будет равна нулю, что отмечается нулевым показанием гальванометра (отсутствием отклонения его стрелки).

Иначе говоря, если в контуре $MmnN$ ток отсутствует, то $\Delta U_{MN} = -\Delta U_{mn}$.

Если при этом каким-нибудь способом получить величину ΔU_{mn} , то тем самым определится и интересующая нас величина ΔU_{MN} . Существенным является то, что при положении компенсации, т. е. когда измеряемая разность потенциалов уравнивается компенсирующей, тока в измерительной цепи нет и сопротивление электродов этой цепи не сказывается на результатах измерения. Это обстоятельство и послужило причиной широкого применения компенсационного способа измерений в электроразведке.

На рис. 28, б в рассмотренную выше схему добавлен компенсатор поляризации. Источником компенсирующей разности потенциалов в компенсаторе служит сухой элемент $\mathcal{E}_{КП}$, ток от которого создает на сопротивлении R падение напряжения, используемое для компенсации помех. Величина компенсирующей разности потенциалов ступенчато и плавно изменяется при помощи сопротивления $R_{доп}$, последовательно включенного в цепь элемента $\mathcal{E}_{КП}$.

Описанный выше компенсационный способ измерения разности потенциалов применен в электроразведочном потенциометре ЭП-1.

Автокомпенсационный способ измерения разности потенциалов

Существенным недостатком электроразведочного потенциометра является то, что при работе в районах с неблагоприятными условиями заземлений низкая чувствительность измерительной линии не позволяет с необходимой точностью измерять малые разности потенциалов. Другой недостаток потенциометра — необходимость последовательного ручного подбора компенсирующей разности потенциалов, что снижает производительность труда и требует от оператора определенных навыков, приобретаемых не сразу.

От указанных недостатков свободен автокомпенсационный способ измерения разности потенциалов, который характеризуется тем, что компенсирующая разность потенциалов подбирается автоматически без участия оператора.

Существуют различные автокомпенсационные схемы, отличающиеся одна от другой главным образом способом установления компенсирующей разности потенциалов: электромеханические, фотоэлектрические, электронные и др. В электроразведке применяется электронный автокомпенсатор ЭСК с непосредственным отсчетом измеряемой разности потенциалов. Принципиальная схема этого автокомпенсатора изображена на рис. 29.

В электронно-стрелочном автокомпенсаторе ЭСК источником компенсирующего напряжения является усилитель постоянного тока $У$. На вход этого усилителя подается разность измеряемого между точками M и N напряжения ΔU_{MN} и компенсирующего напряжения ΔU_{mn} , создаваемого между точками m и n выходным током I_2 усилителя $У$:

$$\Delta U_1 = \Delta U_{MN} - \Delta U_{mn}.$$

Если коэффициент усиления обозначить через K , то напряжение на выходе усилителя ΔU_2 определится из выражения

$$\Delta U_2 = K (\Delta U_{MN} - \Delta U_{mn}),$$

а ток I_2 , текущий через сопротивление R_K , — из выражения

$$I_2 = \Delta U_2 / (R_K + r),$$

где r — сопротивление рамки микроамперметра μA .

Таким образом, величина компенсирующей разности потенциалов

$$\Delta U_{mn} = I_2 R_K = \frac{R_K}{r + R_K} \Delta U_2.$$

Процесс установления этой разности потенциалов может быть представлен следующим образом.

В момент появления в измерительном контуре разности потенциалов ΔU_{MN} ток, текущий через сопротивление R_1 , создает на этом сопротивлении разность потенциалов ΔU_1 ; усиленная до величины ΔU_2 , она приводит к появлению в выходном контуре усилителя тока I_2 и компенсирующего напряжения ΔU_{mn} . Величина компенсирующего напряжения автоматически устанавливается почти равной и обратной по знаку измеряемому напряжению. Полной компенсации произойти не может, так как в этом случае ΔU_1 и, следовательно, ΔU_2 оказались бы равными нулю.

В установившемся режиме почти полной компенсации напряжение на выходе усилителя ΔU_2 определяется выражением

$$\Delta U_2 = K \frac{\Delta U_{MN}}{1 + K \frac{R_K}{r + R_K}},$$

а ток, текущий через сопротивление R_K , — выражением

$$I_2 = \frac{\Delta U_2}{R_K + r} = \frac{\Delta U_{MN}}{R_K \left(1 + \frac{1}{K}\right) + \frac{r}{K}}.$$

Учитывая, что коэффициент усиления K намного больше единицы, а $r \ll R$, последнее выражение можно упростить:

$$I_2 = \Delta U_{MN} / R_K,$$

т. е.

$$\Delta U_{MN} = I_2 R_K.$$

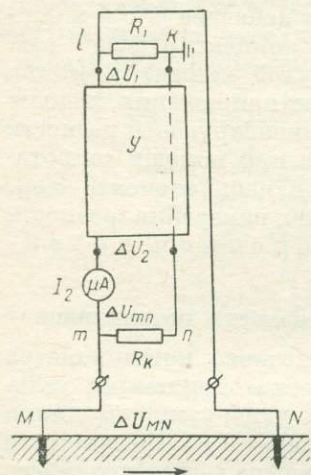


Рис. 29. Принципиальная схема автокомпенсатора ЭСК.

Таким образом, измеряемая разность потенциалов пропорциональна силе тока в выходном контуре, причем коэффициентом пропорциональности является сопротивление R_k . Отсюда вытекает возможность прямого стрелочного отсчета измеряемой разности потенциалов при сохранении компенсационного способа измерения.

Точность измерений описываемым способом практически не зависит от стабильности коэффициента усиления усилителя постоянного напряжения и определяется главным образом классом точности микроамперметра μA , а также стабильностью сопротивления R_k .

Пределы измерений варьируют путем изменения величины этого сопротивления. Для компенсации поляризации электродов и внешних полей в измерительный контур вводят компенсатор поляризации.

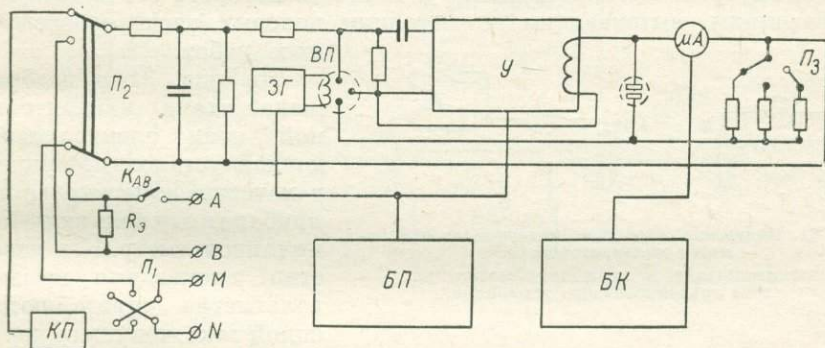


Рис. 30. Скелетная схема автокомпенсатора ЭСК.

$K_{ДВ}$ — ключ замыкания питающей линии; $KП$ — компенсатор поляризации; R_z — эталонированное сопротивление для измерения силы тока; $БП$ — блок питания; $ЗГ$ — генератор звуковой частоты; $ВП$ — вибропреобразователь; $У$ — усилитель; μA — микроамперметр; $БК$ — блок контроля; переключатели: $П_1$ — полярности измерений ΔU , $П_2$ — рода работы, $П_3$ — пределов измерений.

В автокомпенсаторе ЭСК измерение силы тока в питающих линиях электроразведочных установок сводится к измерению падения напряжения на эталонном сопротивлении 0,1 Ом. На рис. 30 изображена скелетная схема выпускаемого в настоящее время автокомпенсатора ЭСК.

По сравнению с потенциометром ЭП-1 автокомпенсатор обладает некоторыми преимуществами, из которых наиболее существенным является высокое входное сопротивление прибора, во много раз превышающее сопротивление заземлений приемной линии даже при работе в районах с тяжелыми условиями заземлений (сухие пески, каменистые осыпи и др.). К преимуществам прибора следует отнести также отсутствие ключа одновременного замыкания. Прямой отсчет измеряемой разности потенциалов позволяет с большей скоростью выполнять измерения.

Стрелочный автокомпенсатор имеет также и некоторые недостатки. Высокое входное сопротивление прибора приводит

при работе в условиях повышенной влажности к появлению утечек из измерительной линии на корпус прибора. Наличие в районе работ изменяющихся со временем внешних полей-помех затрудняет измерение малых разностей потенциалов. Кроме того, автокомпенсатор представляет собой сложную электронную схему, в связи с чем эксплуатация его требует от оператора достаточно высокой квалификации.

Гальванометрический способ измерения разности потенциалов (способ Петровского)

Для измерения разности потенциалов между двумя точками земли может быть использован любой гальванометр, чувствительность, внутреннее сопротивление и точность которого соответствуют требованиям, вытекающим из методики полевых электроразведочных работ.

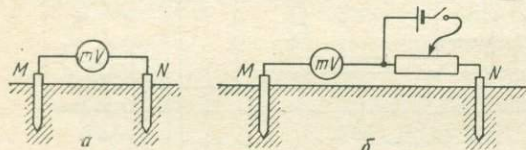


Рис. 31. Измерение разности потенциалов при помощи милливольтметра.

а — милливольтметр в цепи двух заземлений; б — схема градуировочного устройства.

На рис. 31, а изображена схема измерительной цепи электроразведочной установки, причем в качестве измерительного прибора в эту цепь включен милливольтметр. Как известно, показания милливольтметра определяются силой тока, текущего через обмотку этого прибора. В свою очередь сила тока зависит согласно закону Ома от разности потенциалов на входе прибора и полного сопротивления цепи, в которую включен прибор. В данном случае это сопротивление складывается из сопротивления заземлений M и N , сопротивления проводов измерительной линии и внутреннего сопротивления прибора. В то время как две последние величины постоянны и легко могут быть определены, сопротивление заземлений зависит, как известно, от сопротивления той среды, в которую они забиты, от их конфигурации и размеров. При перемещении электроразведочной установки с одного места на другое сопротивление заземлений изменяется. Определение сопротивления заземлений измерительной линии при каждом ее положении на дневной поверхности хотя и возможно, но практически нецелесообразно, так как это существенно замедлило бы процесс полевых работ. Таким образом, при каждом положении измерительной установки на дневной поверхности показания милливольтметра зависят от неизвестной нам величины сопротивления заземлений, которая к тому же соизмерима или значительно больше значения сопротивления остальных элементов измерительной линии. Вследствие этого сами измерения теряют определенность.

А. А. Петровским предложен прием, позволяющий устранять указанный выше недостаток измерения ΔU в токовом режиме. Этот

прием заключается в том, что при каждом положении измерительной установки перед измерением разности потенциалов между электродами M и N в измерительную цепь подается разность потенциалов известной величины (так называемый градуировочный импульс). По отсчитанному на шкале прибора отклонению стрелки и величине градуировочного импульса можно определить цену деления шкалы прибора в милливольтгах или других единицах. Принципиальная схема устройства для подачи в измерительную цепь градуировочного импульса изображена на рис. 31, б. Она представляет собой делитель напряжения, снимаемого с зажимов какого-либо источника постоянного тока.

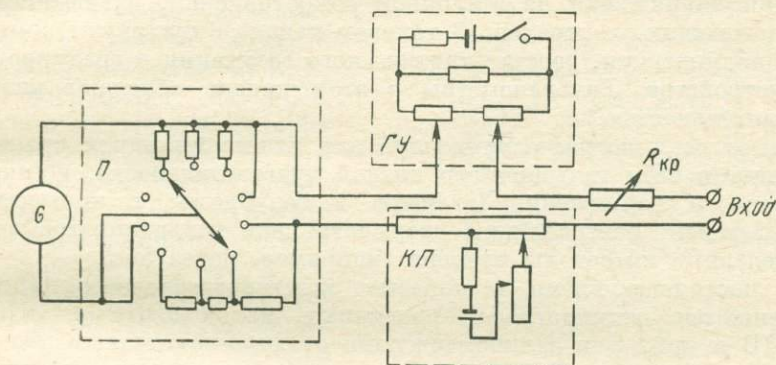


Рис. 32. Принципиальная схема канала осциллографа для записи ΔU .

Описанный прием измерения разности потенциалов используется в электроразведочных осциллографах. Электроразведочный осциллограф представляет собой устройство, позволяющее производить фотографическую регистрацию разности потенциалов между измерительными заземлениями и силы тока в питающей цепи. Поскольку указанные параметры должны регистрироваться одновременно, в электроразведке используются многшлейфовые осциллографы, в которых два шлейфа предназначены для регистрации разности потенциалов в двух приемных линиях (что необходимо при работе некоторыми методами), третий — для регистрации силы тока в цепи питающих электродов, а четвертый — для записи на осциллограмме марок времени, необходимых при работе теми методами, в которых изучается изменение поля со временем (см. ниже). В некоторых типах осциллографов токовый канал отсутствует.

Принципиальная схема канала осциллографа, предназначенного для записи ΔU , изображена на рис. 32.

Помимо магнитоэлектрического гальванометра G , в этом канале имеются реостат затухания (критического режима), позволяющий вводить гальванометр в режим критического затухания, обеспечивающий возможность неискаженной записи ΔU ; двухступенчатый

компенсатор поляризации КП, характеризующийся тем, что знак компенсирующей разности меняется при переходе через нулевое положение реостата; градуировочное устройство ГУ схема которого сходна со схемой источника компенсирующей разности потенциалов в потенциометре ЭП-1, а также переключатель чувствительности П, позволяющий менять чувствительность всего канала по напряжению путем введения в цепь гальванометра шунтирующих и добавочных сопротивлений. Эти сопротивления подбираются таким образом, чтобы изменение чувствительности канала при помощи переключателя не нарушало критического режима работы гальванометра.

Токовый канал осциллографа предназначен для регистрации падения напряжения на эталонном сопротивлении, включенном в цепь питающих электродов. В токовом канале отсутствуют компенсатор поляризации, реостат критического затухания и градуировочное устройство. Гальванометры в этом канале обладают низкой чувствительностью.

Канал осциллографа, служащий для нанесения марок времени, включает в себя гальванометр низкой чувствительности, источник постоянного напряжения (элемент) и секундомер с контактным прерывателем, позволяющим разрывать цепь гальванометра через определенные интервалы времени (например, через 5 с).

В настоящее время в полевых электроразведочных партиях применяются осциллографы различных марок (ЭПО-5, ЭПО-7, ЭПО-7Б и др.). Они отличаются один от другого главным образом конструктивными данными — типом применяемых гальванометров, устройством регистрирующей части и др.

Источники тока

В качестве источников тока при электрической разведке методом сопротивлений применяются батареи сухих элементов или генераторы постоянного тока.

В том случае, когда по условиям работы токи в питающей линии не превышают нескольких ампер, в качестве источников питания используются батареи сухих элементов. В настоящее время выпускаются специальные электроразведочные батареи двух типов: 29-ГРМЦ-13 и 69-ГРМЦ-6. Эти батареи собирают из сухих элементов типа Лекланше двух марок: 2С и КС. Отрицательным полюсом в элементах служит цинк, а положительным — уголь. В качестве электролита применяется раствор хлористого аммония NH_4Cl , а в качестве деполяризатора — перекись марганца.

Элемент марки 2С размером $40 \times 40 \times 85$ мм имеет следующие параметры: э. д. с. 1,5—1,6 В, внутреннее сопротивление в свежем состоянии 1 Ом, рабочий ток 0,5—0,6 А. Элемент марки КС отличается от 2С бóльшим размером ($70 \times 70 \times 155$ мм) и соответственно бóльшей емкостью.

Батарея 69-ГРМЦ-6 состоит из 48 элементов марки 2С и упакована в деревянном ящике размером $155 \times 306 \times 396$ мм. Масса

батареи 18 кг. Пространство между элементами и стенками ящика для улучшения изоляции залито варом. Элементы внутри батареи соединены последовательно в две секции по 24 элемента в каждой. Напряжение секции равно 36 В. Полюсы каждой секции выведены к латунным гнездам эбонитовой панели, укрепленной на боковой стенке ящика. Расположение полюсов на панели показано на рис. 33, а. Крайние гнезда оставлены пустыми. Это дает возможность, пользуясь стандартными полевыми вилками, включать секции батареи либо последовательно на 72 В, либо параллельно на 36 В. Способы включения батареи показаны на рис. 33, б. Емкость батареи 3 А·ч, рабочий ток при последовательном включении секции 0,3—0,6 А, при параллельном — 1 А.

Батарея 29-ГРМЦ-13 состоит из 20 элементов марки КС. Размер ящика батареи $244 \times 411 \times 336$ мм, масса 28 кг. Элементы сгруппированы в две секции по 10 элементов в каждой. Полюсы секций выведены на панель. При последовательном соединении секций напряжение батареи равно 30 В, при параллельном — 15 В. В первом случае рабочий ток 1 А, во втором — 2 А. Емкость батареи 15 А·ч. Способы включения батареи показаны на рис. 33, в.

При эксплуатации батарей необходимо следить за тем, чтобы рабочий ток не превышал указанных выше номинальных значений. В случае необходимости секции батарей включают параллельно или применяют параллельное включение нескольких батарей.

Машинные генераторы постоянного тока используются при работе с установками, имеющими большие разности. В этом случае, чтобы обеспечивалась достаточно большая разность потенциалов

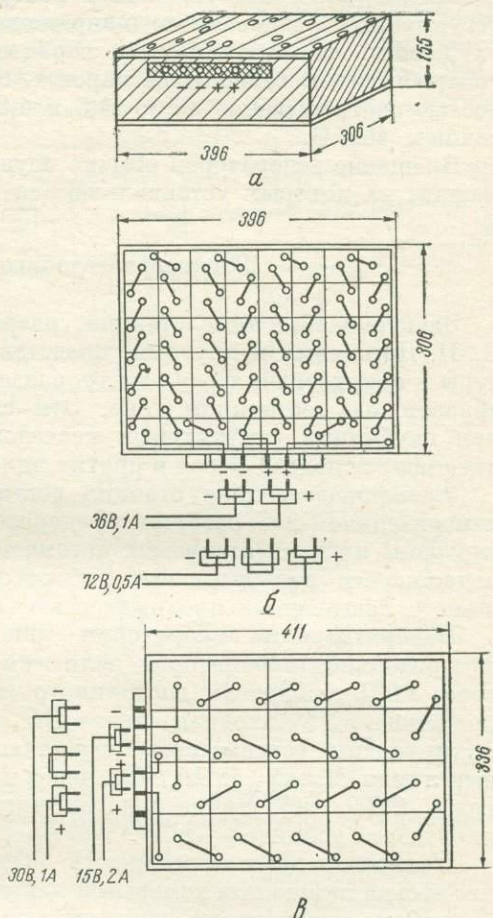


Рис. 33. Электроразведочные батареи.

а — общий вид батареи 69-ГРМЦ-6; схемы внутренних соединений и способы включения в питающую цепь: б — батареи 69-ГРМЦ-6, в — батареи 29-ГРМЦ-13.

между измерительными электродами, ток в цепи питающих электродов иногда должен достигать нескольких десятков ампер. Батареи сухих элементов такой ток создать не могут.

В электроразведочных установках обычно применяют генераторы с параллельным возбуждением. Генераторы этого типа допускают регулировку развиваемого напряжения в широких пределах без ухудшения эксплуатационных характеристик генератора. Наиболее употребительны генераторы марок ¹ ПН-145, ПН-100 и ПН-68 мощностью соответственно 16,5; 11,5 и 4,8 кВА и номинальным напряжением 460 В.

Вращение генераторов обычно осуществляется двигателями автомашин, на которых устанавливаются генераторы.

Электроразведочные станции

Электроразведочные станции, разработанные А. М. Алексеевым, Б. П. Ярышевым и другими, представляют собой комплект аппаратуры и оборудования для электроразведочных исследований главным образом на постоянном токе. Эти станции широко применяются при глубинных структурных исследованиях и в настоящее время начинают использоваться в других видах электроразведочных работ.

Электроразведочная станция состоит из двух основных узлов: измерительной лаборатории и генераторной группы. Эти узлы смонтированы на двух отдельных автомашинах, причем для увеличения подвижности измерительная лаборатория устанавливается на машине с повышенной проходимостью (ГАЗ-66, ПАЗ-65-1Е).

Измерительная лаборатория (рис. 34, а). Основными узлами измерительной лаборатории являются электроразведочный осциллограф ЭПО, усилители постоянного (и медленно меняющегося) напряжения ЭЛУ, входная панель ВП, панель управления ПУ с коммутирующим устройством, позволяющим подключать измерительные линии M_1 , N_1 и M_2 , N_2 , через измерительную панель осциллографа ИПО либо прямо к регистрирующему каналу осциллографа, либо через усилитель ЭЛУ.

Усилители дают возможность регистрировать слабые сигналы, что весьма важно при измерении кажущегося сопротивления с очень большими установками, при исследовании естественных электромагнитных полей земли, а также при использовании некоторых других методов электроразведки, в которых исследуются медленно меняющиеся нестационарные поля.

Помимо перечисленных блоков, в измерительной лаборатории имеется узел связи — приемно-передающая коротковолновая радиостанция РС, обеспечивающая двухстороннюю радиосвязь между

¹ Генераторы этих марок имеют обмотки последовательного и параллельного возбуждения, однако обмотки последовательного возбуждения не используются.

полевой лабораторией и генераторной группой, а также телевключатель *ТВ*. Телевключатель предназначен для синхронной записи марок времени на осциллограммах измерительной лаборатории и генераторной группы или на осциллограммах двух измерительных лабораторий при некоторых методах полевых исследований. Телевключатель, работающий в режиме передачи, представляет собой устройство, модулирующее несущую частоту приемно-передающей радиостанции сигналами звуковой частоты. Длительность этих сигналов задается либо контактным хронометром, имеющимся в осциллографе, либо специальным генератором. Телевключатель, работающий в режиме приема, демодулирует и детектирует принятый радиостанцией сигнал и обеспечивает питающие маркировочного канала осциллографа импульсами постоянного тока, синхронными с такими же импульсами на осциллографе станции, задающей марки времени.

Низковольтная панель *НП* измерительной лаборатории дает возможность контролировать напряжение и расход тока аккумуляторов *Ак*, обеспечивающих низковольтное питание всех узлов лаборатории; она же позволяет подключать их на зарядку.

Генераторная группа (рис. 34, б). В генераторной

группе источниками тока питающих заземления *A* и *B* служат два генератора G_1 и G_2 марки ПН, сидящие на общем валу и вращаемые двигателем автомашины через коробку отбора мощности. При помощи коммутирующих устройств, сосредоточенных на пульте управления *ПУ* станции, генераторы можно подключать к питающей линии параллельно или последовательно, а также выключать один из них. Это позволяет оператору выбрать режим работы станции, оптимальный при данном размере установки, условиях заземлений и др. Измерительные приборы, размещенные на пульте управления, позволяют контролировать напряжение и ток каждого генератора, суммарные ток и напряжение в цепи питающих заземлений. Регулировка напряжения осуществляется изменением как сопротивления

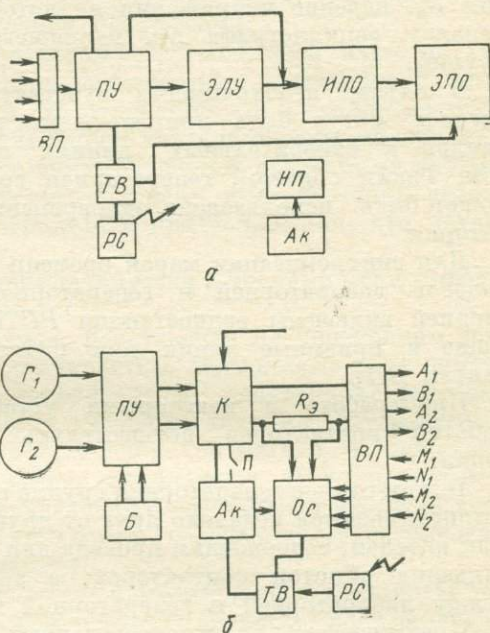


Рис. 34. Блок-схема электроразведочной станции ЭРСУ-60.

а — измерительная лаборатория; б — генераторная группа.

в цепи обмоток возбуждения, так и числа оборотов двигателя автомашины. При работе с установками небольших размеров в качестве источников тока могут быть использованы батареи *B* марки 69-ГРМЦ-6, комплект которых имеется в станции.

Подключение генераторов или батарей к питающим заземлениям осуществляется при помощи мощных электромагнитных выключателей контакторов *K*, управляющие обмотки которых питаются аккумуляторами *A* через выключатель *П*.

В цепь питающих заземлений включены эталонные сопротивления *R_s*, падение напряжения на которых регистрируется токовым каналом осциллографа *Oс*, входящего в комплект генераторной группы.

В случае необходимости чувствительные каналы этого осциллографа могут быть применены для регистрации разности потенциалов в измерительных линиях электроразведочных установок. Таким образом, генераторная группа в некоторых условиях может быть использована одновременно и как измерительная лаборатория.

Для синхронизации марок времени и операторской связи между полевой лабораторией и генераторной группой в комплект последней включены радиостанция *РС* и телевыключатель *ТВ*. Питающие и приемные линии при работе подключаются к входной панели *ВП*.

При работе с некоторыми установками удобно управление работой контакторов осуществлять из измерительной лаборатории.

В этом случае генераторная группа и измерительная лаборатория устанавливаются недалеко друг от друга и соединяются многожильным кабелем, содержащим провода для переключения питания управляющих обмоток контакторов, а также для телефонной связи между лабораторией и генераторной группой.

Преимущества электроразведочных станций перед установкой с потенциометром или автокомпенсатором и батареями заключаются в возможности:

1) использования мощных источников тока, что, в свою очередь, позволяет увеличить размеры электроразведочных установок и соответственно глубину исследований;

2) полного отделения питающей цепи от приемной (запись ΔU и *I* на отдельных осциллографах); при работе с дипольными установками указанное обстоятельство позволяет, как это будет показано ниже, значительно уменьшить количество проводов, а тем самым сократить потери мощности в них;

3) одновременной записи разности потенциалов в двух измерительных цепях.

Существенным преимуществом станций является также то, что осциллографическая запись измеряемых величин характеризуется большей объективностью по сравнению с компенсационным способом измерений.

Применение низкочастотной аппаратуры при работе методами постоянного поля

Характер низкочастотного переменного электромагнитного поля в земле существенно зависит от безразмерного параметра (см. гл. IX):

$$p = 2,81 \sqrt{f/\rho r},$$

где ρ — сопротивление среды; f — частота поля; r — расстояние между источником поля и точкой наблюдения.

Из теории переменных электромагнитных полей известно, что при $p \rightarrow 0$ переменное электромагнитное поле, созданное в земле при помощи двух заземлений, не отличается от постоянного поля. Это обстоятельство служит основанием для применения низкочастотных полей при работе методом сопротивлений и некоторыми другими методами, теория которых, а также приемы интерпретации результатов полевых наблюдений строятся в предположении, что изучаемое поле постоянно.

Применение переменного тока технически и экономически выгодно по следующим соображениям.

1. Измерительная аппаратура, работающая на переменном токе, отличается высокой помехоустойчивостью. Постоянные поля-помехи, связанные с поляризацией измерительных электродов, действием естественных полей, а также с утечками тока из промышленных установок, питаемых постоянным током, не влияют на показания прибора, измеряющего переменное напряжение. Влияние переменных полей с частотой, не совпадающей с собственной частотой аппаратуры, может быть резко уменьшено посредством электрических фильтров в измерительном канале.

2. Высокая помехозащищенность измерительного устройства позволяет использовать в нем усилители с большим коэффициентом усиления, что обуславливает существенное снижение мощности источников тока в цепи питающих заземлений и, таким образом, снижение стоимости работ.

Однако при применении переменного тока низкой частоты следует помнить, что размеры установок (расстояние между питающими и измерительными заземлениями) не должны превышать 0,5—1,0 км. В противном случае различия между постоянными и переменными полями становятся недопустимо большими.

В настоящее время приборостроительная промышленность серийно изготавливает комплект аппаратуры для работы с низкочастотными полями — измеритель кажущегося сопротивления ИКС. В комплект аппаратуры входят генераторное устройство и измерительные приборы (микровольтметры).

Источником тока в комплекте аппаратуры ИКС служит транзисторный генератор, преобразующий постоянное напряжение батарей или бензоэлектрического агрегата в переменное, прямоугольно-импульсное, меняющееся с частотой 22,5 Гц. В зависимости от типа

и размеров электроразведочных установок применяется генератор мощностью 1 Вт (комплект ИКС-1), 50 Вт (ИКС-50) и 600 Вт (ИКС-600).

Выходной ток генератора стабилизирован таким образом, что сила его отклоняется от номинального значения не более чем на 1%.

Разность потенциалов между приемными заземлениями измеряется при помощи микровольтметра, в котором используется компарационный способ измерения (способ сравнения). Скелетная схема микровольтметра ИКС-1 изображена на рис. 35. Измеряемый сигнал ΔU подается на калиброванный ступенчатый делитель напряжения D и затем через переключатель Π на вход усилителя $У$, снабженного

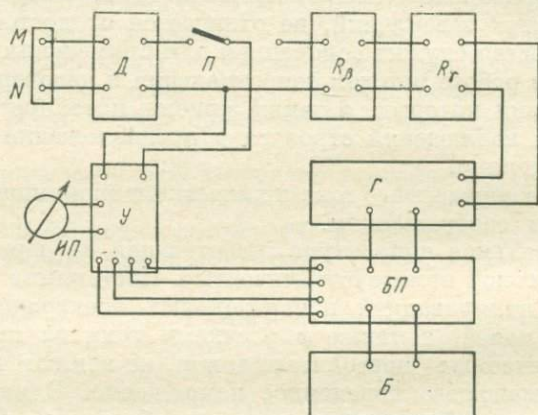


Рис. 35. Скелетная схема микровольтметра ИКС-1.

на выходе стрелочным индикатором. Показания этого индикатора соответствуют величине $K\Delta U/\alpha$; здесь K — коэффициент усиления; α — коэффициент деления делителя D .

Для формирования опорного сигнала служит специальный генератор G , выходной ток которого $I_{\text{вых}}$ стабилизирован и равен 1 мА. Генератор нагружен на ступенчато и плавно меняющиеся сопротивления R_β и R_γ . Падение напряжения на этих сопротивлениях используется в качестве опорного сигнала $\Delta U_{\text{оп}}$. В соответствии с законом Ома величина

$$\Delta U_{\text{оп}} = (R_\beta + R_\gamma) I_{\text{вых}} = [(R_\beta + R_\gamma) \cdot 1] \text{ мВ.}$$

Величина опорного сигнала выбирается такой, чтобы стрелочный индикатор на выходе усилителя установился в том же положении, что и при подаче на его вход сигнала $\Delta U/\alpha$. В этом случае

$$K \Delta U/\alpha = K [(R_\beta + R_\gamma) \cdot 1] \text{ мВ;}$$

тогда

$$\Delta U = \alpha [(R_\beta + R_\gamma) \cdot 1] \text{ мВ,}$$

откуда следует, что нестабильность коэффициента усиления усилителя не оказывает влияния на результаты измерения и надежность

их зависит только от стабильности опорного генератора, точности делителя и подбора величин сопротивлений R_3 и R_4 .

В том случае, когда ток питающего генератора, используемого в комплекте ИКС, стабилизирован на величине 1 сА, чтобы измерить отношение $\Delta I/I$, входящее в выражение для ρ_k , достаточно измеренный сигнал разделить на 10. Для этого делитель D снабжен дополнительной шкалой, оцифрованной непосредственно в омах. Питание измерителя осуществляется от батареи B через блок питания $БП$.

Провода

Применяемые при электрической разведке провода должны обладать высоким качеством электрической изоляции и большой механической прочностью. Эти требования определяются теми условиями, в которых производятся работы. При полевых работах провода обычно располагают непосредственно на поверхности земли, где они подвергаются действию атмосферных осадков, влаги, скапливающейся на растительности, почвенных вод и т. д.

В этих условиях провода с плохой изоляцией создают возможность утечек тока через изоляцию, а это влечет за собой ошибки в измерениях. К тому же провода многократно перетаскивают с одной точки на другую, разматывают и наматывают на катушки. При этом металлическая жила провода испытывает большие разрывные усилия и в случае недостаточной механической прочности часто рвется; изоляция провода вследствие трения о поверхность земли, деревьев, камни и т. п. подвергается усиленному износу и теряет свои изолирующие свойства.

Провода должны также обладать малым электрическим сопротивлением, чтобы падение напряжения в них было минимальным. Это особенно необходимо соблюдать при работе с большими установками, так как в данном случае (в отличие от установок малых размеров) значительная часть общего сопротивления питающей цепи приходится на провода, а не на заземления. При большом сопротивлении проводов для создания в земле токов достаточной силы пришлось бы значительно увеличивать напряжение батарей или генераторов, что опасно с точки зрения поражения обслуживающего персонала током. Это приводит к расходу энергии, а также увеличению возможности возникновения утечек.

В настоящее время при полевых исследованиях в зависимости от модификаций электрических методов разведки и установок (размеры от нескольких метров до нескольких десятков километров) применяются провода различных марок.

В табл. 2 приведены характеристики проводов, наиболее часто применяемых при электроразведочных работах.

Для продления срока службы проводов необходимо оберегать от повреждений как изоляцию, так и металлические жилы проводов. С этой целью надо соблюдать следующие правила.

Таблица 2

Марка провода	Наружный диаметр, мм	Масса 1 км, кг	Электрическое сопротивление, Ом · км	Электрическое сопротивление изоляции, МОм · км	Назначение
ГПМП	5,6	73	3,1	100	Зондирования с АВ свыше 8—10 км; ЧЗ, ЗС, ВП с большими разносами
ГПСМП	4,6	38	10	100	Зондирования с АВ = 3 ÷ 8 км; профилирование с АВ свыше 3 км
ГПСМПО	3,25	14,5	50	100	Зондирования с АВ меньше 3 км; электроразведочные работы с малыми установками

1. Хранить и перевозить все провода (за исключением новых бухт заводской смотки) только на катушках. Сматывать провода в бухты во время работы разрешается только для кусков длиной не более 50—100 м. При перемотке заводских бухт на катушки следить за тем, чтобы провода не закручивались, для чего применять специальные смоточные станки.

2. Хранить провода и катушки в сухом месте, закрытом от дождя и солнца. В склад на хранение сдавать провода только в сухом и очищенном от грязи виде. На каждой катушке должна быть бирка с указанием количества метров провода, а также его назначения.

3. Не наматывать на одну катушку одновременно два куска провода и более. Нельзя также связывать или скручивать провода двух линий и более в один кабель.

4. Не сматывать провода на катушки в мокром состоянии. Если это пришлось сделать, то при возвращении на базу необходимо просушить провод, размотав его с катушек.

5. При размотке провода не бросать его на землю в беспорядке, а при перетягивании или смотке не допускать образования петель (закруток), являющихся причиной быстрой порчи на этих местах оплетки и обрыва металлической жилы.

6. При работе в залесенной или каменистой местности следить за тем, чтобы провод не цеплялся за пни, корни, кусты, не терся об острые камни.

7. При пересечении дорог не допускать переезда проводов телегами, тракторами, автомашинами. Для пропуска транспорта нужно поднимать провод вверх или подвешивать на шестах. При пересечении железнодорожного полотна пропускать провод под рельсами.

8. При разматывании, сматывании и перетаскивании проводов не допускать большой перегрузки. Нагрузку на длинные линии надо распределять равномерно. Рабочие, тянущие провода, должны находиться друг от друга на расстоянии 200—300 м. Для провода ГПМП допускается перетягивание интервалами до 500 м.

9. При сматывании проводов после окончания рабочего дня необходимо его просматривать. Места с поврежденной изоляцией немедленно ремонтировать.

При поврежденной изоляции, если обнажилась металлическая жила, провод очищают на 2—3 см в обе стороны от места повреждения. Ремонтруемое место смазывают резиновым клеем и, когда клей подсохнет, покрывают резиновой лентой. Затем снова намазывают резиновым клеем и покрывают вторым слоем резиновой ленты. Поверх резиновой ленты наматывают два-три слоя смоляной ленты, захватывая ею неповрежденный провод на 3—4 см с каждой стороны ремонтруемого участка.

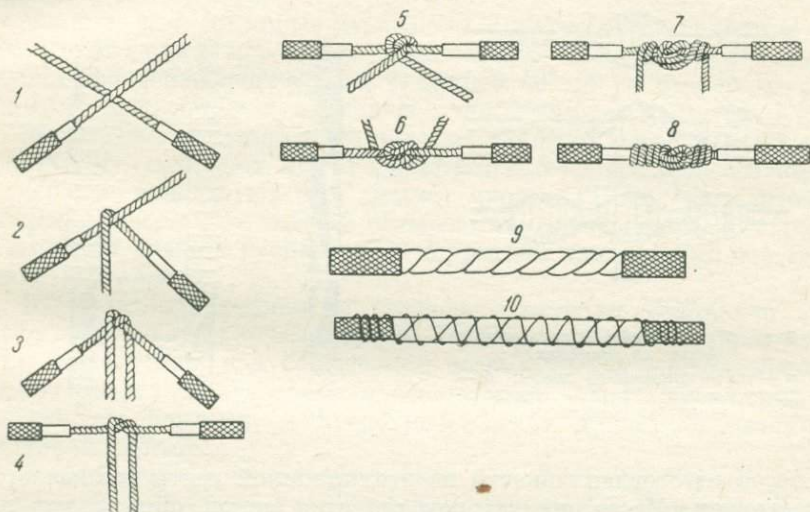


Рис. 36. Последовательность операций (1—10) сращивания проводов.

В процессе монтажа и ремонта полевых электроразведочных установок приходится сращивать концы проводов.

При сращивании концы проводов оголяют на 5—7 см. Приложив оголенные концы проводов друг к другу (серединками), связывают их узлом, а внешние концы туго закручивают (рис. 36). Ни в коем случае не следует откусывать стальные проволоки, так как они принимают на себя всю механическую нагрузку. Обжав место сращивания плоскогубцами, оголенные части проводов и изоляцию покрывают двумя слоями резиновой ленты с проклейкой резиновым клеем, а затем обматывают смоляной лентой.

Для определения повреждения проводов с разрывом жилы под изоляцией или нарушения в месте сращивания их «прозванивают» при помощи потенциометра или автокомпенсатора. Для этого оба конца испытываемого отрезка провода подключают к клеммам *MN* прибора и компенсатором поляризации вводят в измерительную линию 40—50 мВ. Отклонение стрелки гальванометра указывает

на отсутствие обрыва жилы провода. Если стрелка гальванометра не отклоняется, то это свидетельствует об обрыве жилы провода. Место обрыва находят путем тщательного осмотра провода; изоляцию разрезают и указанным выше способом сращивают обе части провода.

Для удобства выполнения полевых операций на проводах питающих и приемных линий ставят метки, по которым затем определяют величину разноса питающих и приемных электродов. Метки изготовляют либо из изоляционной ленты, либо из проволоки. На проводах с хлорвиниловой изоляцией метки удобно наносить цветной тушью.

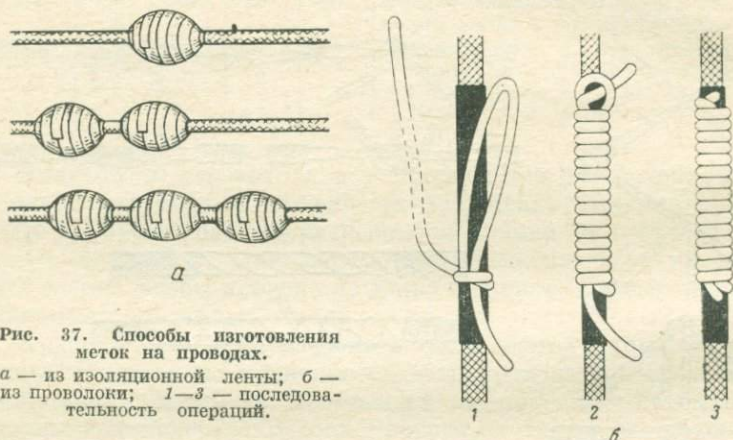


Рис. 37. Способы изготовления меток на проводах.
a — из изоляционной ленты; *б* — из проволоки; 1—3 — последовательность операций.

Способ изготовления метки из изоляционной ленты заключается в следующем. Место, на котором ставится метка, обматывают несколькими слоями изоляционной (смоляной) ленты. Каждый последующий слой ленты накладывают, немного отступя от края предыдущего, так, чтобы на проводе получилось веретенообразное утолщение. Длина метки 2—3 см, толщина до 1,5 см (рис. 37, *a*).

Проволочные метки изготовляют следующим образом. Место провода, на которое нужно нанести метку, на протяжении 4,5—5 см обматывают изоляционной лентой в два-три слоя. На изолированный участок, отступя от края на 0,5 см, накладывают и закрепляют петлю из отрезка медной оголенной проволоки диаметром 0,5—0,8 мм и длиной около 50 см. Длинный свободный конец проволоки обвивают вокруг провода, прижимая к нему петлю так, чтобы витки плотно прилегали друг к другу. Конец проволоки пропускают в петлю, которую затем затягивают; лишние кончики откусывают. Ширина метки 2,5—3 см. Способ ее изготовления показан на рис. 37, *б*. Изготовленная таким способом метка долговечна, не сдвигается вдоль провода и хорошо заметна.

Метки на хлорвиниловой изоляции ставят тушью или чернилами. Для этого провод смачивают тушью и вносят в пламя свечи на 1—2 с.

Эту операцию повторяют несколько раз, пока тушь не войдет плотным хорошо заметным слоем в изоляцию провода. При нагревании провода нужно следить за тем, чтобы не повредить его изоляцию.

Заземления

В качестве заземлений при работе методом сопротивлений обычно применяют железные, латунные или медные электроды стержневого типа, соединенные параллельно для уменьшения сопротивления заземления в связки, включающие от двух-трех до нескольких десятков электродов.

Медные или латунные электроды (пикеты), применяемые для заземления приемной цепи, представляют собой полые медные трубки диаметром около 20 мм и длиной 40—50 см с прочным деревянным сердечником и массивным наконечником из меди.

Железные электроды обычно имеют длину от 0,5 до 1 м; их изготовляют из сплошного прута диаметром 1,5—2 см. Для соединения электродов используют или старый провод ГПСМ, или антенный канатик. Расстояние между штыревыми электродами в сложном заземлении должно равняться 2—3-кратной длине забитой в землю части заземления.

В местах присоединения провода электроды тщательно зачищают напильником или шкуркой. Провод пропускают через отверстие в электроде, под натяжением несколько раз плотно обвивают вокруг пикета и затягивают плоскогубцами. Место соединения для надежности контакта и предохранения от окисления изолируют смоляной лентой.

К одному из крайних электродов связки прикручивают отрезок провода длиной около 1 м с зачищенным концом. При помощи этих проводников связки соединяются друг с другом, а также подключаются к проводам питающей или измерительной линий. Иногда в этом случае на конец проводника надевается вилка.

В процессе полевой работы необходимо периодически проверять состояние контактов в связке. При работе в районах с сухим почвенным слоем (пески и т. п.) приходится применять заземления увеличенных размеров. Иногда в этом случае электроды изготовляют из углового железа или водопроводных труб. Вообще форма и размеры заземлений определяются конкретными условиями и могут быть самыми разнообразными.

Вспомогательное оборудование

Катушки с подставками необходимы для хранения, транспортировки, размотки и смотки проводов различных электроразведочных установок. Наиболее распространенными являются катушки, вмещающие 500 м провода ГПСМ. Общий вид такой катушки изображен на рис. 38. Сердечник полевой катушки изготовляется из дерева или листового железа, щеки — из листового железа

или из многослойной фанеры, окантованной жестью. На одной из щек укрепляется эбонитовая или текстолитовая панель с гнездами, рассчитанными на стандартную вилку. С внутренней стороны катушки к гнездам подключается один из концов провода, намотанного на катушку.

Молотки применяются для забивки электродов в землю. Для забивки железных электродов обычно используют железные кувалды весом 3—5 кг. Использование кувалд для забивки медных электродов недопустимо, так как это приводит к быстрой порче электродов и, таким образом, к повышению расхода дорогостоящего цветного металла.

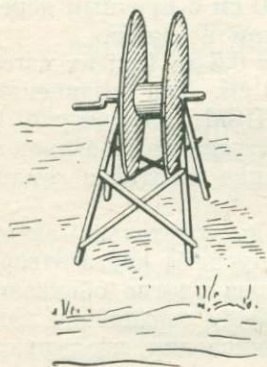


Рис. 38. Полевая электро-разведочная катушка.

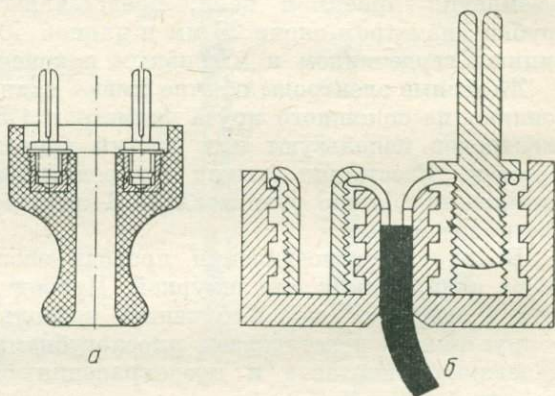


Рис. 39. Полевые электроразведочные вилки.
а — резиновые; б — текстолитовые.

Для забивки медных электродов применяют деревянные молотки, изготовленные из твердых пород дерева и окованные для прочности железными обручами.

Изоляционный материал и ремонтный инструмент необходимы для монтажа и текущего ремонта электроразведочных установок. Он включает резиновую и смоляную изоляционную ленты, резиновый клей, перочинный нож большого размера, отвертку, плоскогубцы и кусачки. Набор изоляционного материала и инструмента должен храниться у старшего рабочего, отвечающего за состояние электроразведочной установки.

Полевые вилки широко применяются в электроразведочных установках для устройства разъемных соединений. В текстолитовом или резиновом корпусе вилки заштампованы буксы с резьбовыми отверстиями, в которые по желанию можно ввинтить штырь или гнездо. Разрез полевых вилок с резиновым и текстолитовым корпусами изображен на рис. 39 (резиновые вилки предпочтительнее вследствие их большей прочности).

§ 5. УТЕЧКИ ТОКА И МЕРЫ ПО ИХ УСТРАНЕНИЮ

Во всех предыдущих рассуждениях мы полагали, что ток в землю поступает только через питающие заземления, а измерительная линия заземлена лишь в точках M и N . Однако несовершенство электрической изоляции проводов и других элементов установки для работы методом сопротивлений приводит к тому, что электрический ток поступает в землю помимо питающих заземлений через места с поврежденной изоляцией проводов, через упаковку и подстилку батарей и т. п.

Приемная линия вследствие тех же причин может оказаться заземленной не только в точках M и N , но и в местах утечек. Утечки в питающей и приемных линиях приводят к ошибкам в измерении кажущегося сопротивления.

Рассмотрим случай утечки из питающей цепи. Для простоты возьмем симметричную установку с измерительным прибором $ИП$, расположенную на поверхности однородной среды с удельным сопротивлением ρ (рис. 40, a).

Предположим, что в точке C , отстоящей от центра установки на расстоянии x , происходит утечка тока из питающей цепи в землю. Эта утечка эквивалентна добавочному заземлению в точке C , из которого в землю ответвляется некоторая часть общего тока, поступающего в землю из батарей. На рис. 40, b изображена эквивалентная схема. Здесь заземления A , B и C заменены эквивалентными сопротивлениями R_A , R_B и R_C .

Дополнительного заземления в точке утечки, не учитываемое коэффициентом установки, приведет к тому, что величина ρ_k , рассчитываемая по формуле

$$\rho_k = K \Delta U / I,$$

будет отличаться от истинного сопротивления однородной среды.

Можно доказать, что относительная ошибка за счет влияния утечки тока определяется выражением

$$\frac{\Delta \rho_k}{\rho} = \frac{\rho_k - \rho}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{R_A}{R_A + R_C} \left(\frac{4r_{MN}r_{AN}}{4x^2 - r_{MN}^2} - 1 \right).$$

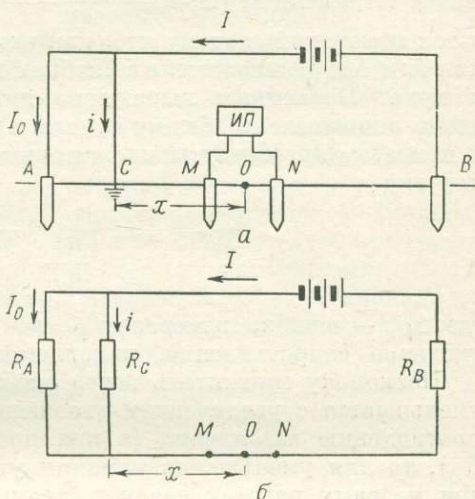


Рис. 40. Пример утечки из питающей линии. Схемы: a — принципиальная, b — эквивалентная.

Из последнего выражения следует, что величина относительной ошибки зависит от положения места утечки, т. е. от расстояния ее от центра установки, а также от соотношения сопротивлений заземлений и утечки.

Относительная ошибка за счет утечки из питающей линии стремится стать бесконечно большой при приближении места утечки к одному из приемных заземлений, т. е. при $x \rightarrow r_{MN}/2$, и, наоборот, при расположении места утечки в непосредственной близости к питающим заземлениям ($x \rightarrow \frac{r_{AM} + r_{AN}}{2}$) она не сказывается на результатах измерений, потому что, как это нетрудно показать, в выражении для $\Delta\rho_k/\rho$ множитель в скобках для данного случая обращается в нуль. Перепишем выражение для относительной ошибки так, чтобы оно отвечало общему случаю измерений в неоднородной среде, и при этом преобразуем множитель в правой части. Тогда оно примет вид

$$\frac{\Delta\rho_k}{\rho_k} = \frac{1}{2} \frac{1}{1 + \frac{R_C}{R_A}} \left(\frac{4r_{AM}r_{AN}}{4x^2 - r_{MN}^2} - 1 \right),$$

где $\Delta\rho_k$ — ошибка измерения ρ_k за счет утечки; ρ_k — кажущееся удельное сопротивление, измеряемое при отсутствии утечки.

Поскольку множитель перед скобками в полученном выражении уменьшается с увеличением отношения сопротивления утечки к сопротивлению заземления (а при постоянном R_C — с уменьшением R_A), то для уменьшения влияния утечек на результаты измерений при полевых работах следует стремиться к уменьшению сопротивления питающих заземлений.

В процессе полевых работ надо тщательно следить за тем, чтобы утечки тока из различных элементов установки не искажали величины кажущегося сопротивления.

Контроль за утечками может быть осуществлен двумя способами.

Первый способ заключается в том, что дополнительно к основному измерению проводится второе измерение кажущегося сопротивления при измененном сопротивлении питающих заземлений. В том случае, если утечки в питающей цепи отсутствуют, изменение сопротивлений заземлений A и B приведет к пропорциональному изменению ΔU и I . Кажущееся сопротивление при этом не изменится. При наличии утечек изменение сопротивлений питающих заземлений вызовет изменение кажущегося сопротивления, поскольку меняется соотношение между током утечки и током, проходящим через питающие заземления.

Изменение сопротивлений питающих заземлений при контрольном замере достигается чаще всего путем изменения числа электродов в сложном заземлении.

Следует иметь в виду, что различие величин кажущегося сопротивления при основном и контрольном замерах в случае наличия утечки тока будет заметно лишь при значительном изменении сопро-

тивлений заземлений *A* и *B*. Принято менять это сопротивление таким образом, чтобы сила тока в питающей цепи при обоих замерах отличалась не менее чем на 25% от ее первоначального значения. Изменение кажущегося сопротивления при этом не должно превышать 5%.

Второй способ контроля за утечками тока заключается в том, что заземления питающей цепи попеременно отключают и при отключенном и поднятом в воздухе конце провода питающей линии измеряют разность потенциалов между приемными заземлениями *M* и *N*. При отсутствии утечек эта разность потенциалов, которую обозначим через $\Delta U_{\text{ут}}$, будет равна нулю. Допустимыми являются утечки, которые создают величину $\Delta U_{\text{ут}}$, составляющую не более 2% разности потенциалов $\Delta U_{\text{к}}$, измеряемую при определении кажущегося сопротивления. Если $\Delta U_{\text{ут}} > 0,02 \cdot \Delta U_{\text{к}}$, провода питающей линии проверяют и устраняют повреждения изоляции.

При работе в сырую погоду, на влажной местности и т. п. необходимо особо тщательно принимать меры против утечек. Возможные места утечек (провода питающих линий и батареи) следует предельно удалять от приемной линии и не допускать перекрещивания проводов питающей и приемной линии. Батареи нужно устанавливать на резиновом коврике в центре приемной линии, так как в этом положении утечки из них будут мало сказываться на разности потенциалов между приемными электродами.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

§ 1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ КРИВЫЕ ВЭЗ
И ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПАЛЕТОК

Предположим, что на дневной поверхности расположена симметричная четырехточечная установка AMNB. Величина кажущегося сопротивления, измеренного этой установкой, зависит от того, как распределены в нижнем полупространстве породы с различным удельным сопротивлением, а также от взаимного расположения питающих и измерительных заземлений, так как глубина проникновения тока в землю прямым образом зависит от расстояния между заземлениями A и B. Наибольшее влияние на значение ρ_k оказывают породы, находящиеся в том объеме среды, в котором распределяется основная часть тока. Породы, лежащие на глубине, большей по сравнению с расстоянием между питающими заземлениями, практически не окажут влияния на распределение тока у дневной поверхности и соответственно на значение ρ_k .

Если, не меняя положения центра установки, увеличивать расстояние между питающими заземлениями, то глубина проникновения тока в землю увеличивается и соответственно этому на значение ρ_k начинают оказывать влияние породы, залегающие на большей глубине. Таким образом, измерение ρ_k установкой с изменяющимся расстоянием между питающими заземлениями при неизменном положении ее центра позволяет изучать изменение геологического разреза с глубиной. Описанный способ изучения кажущегося сопротивления носит название метода вертикального электрического зондирования или метода ВЭЗ.

Результаты полевых наблюдений представляют в виде кривых зависимости кажущегося сопротивления от расстояния между питающими заземлениями.

Все сказанное в отношении установки AMNB может быть распространено на любую другую установку метода сопротивлений. В зависимости от типа установки различают следующие виды зондирования:

- 1) четырехточечные зондирования симметричной установкой AMNB (см. рис. 25, а);
- 2) трехточечные зондирования установкой AMN, $B \rightarrow \infty$ (см. рис. 25, б);
- 3) двухточечные зондирования установкой AM, $N \rightarrow \infty$, $B \rightarrow \infty$ (см. рис. 25, в);
- 4) дипольные зондирования установкой ABMN (см. рис. 27).

В первом из указанных видов зондирований изучают зависимость ρ_k от расстояния $AB/2$, во втором — от расстояния AO , в третьем — от расстояния AM , в четвертом — от расстояния между центрами питающего и приемного диполей.

В настоящее время первые три вида зондирований принято сокращенно называть соответственно четырехточечное или симметричное ВЭЗ, трехточечное ВЭЗ, а дипольные зондирования — ДЗ. Сокращение ВЭЗ применяется также к методу электрических зондирований в целом.

Наибольшее применение получили симметричные и дипольные зондирования, однако теорию метода будем излагать применительно к зондированиям установкой AMNB, что позволит полнее представить сущность метода ВЭЗ вообще безотносительно к типам установок. Лишь некоторые специфичные вопросы теории дипольных зондирований рассмотрим отдельно, как и условия, определяющие выбор тех или иных установок.

Зависимость кажущегося сопротивления от расстояния между заземлениями A и B для различных геоэлектрических разрезов весьма сложна. Теоретический расчет этой зависимости основывается на расчете поля точечного источника тока при наличии неоднородных сред. К настоящему времени такие расчеты произведены лишь для простейших геоэлектрических разрезов, к числу которых прежде всего относятся разрезы с плоскопараллельными поверхностями раздела. В связи с этим теория метода, как и его использование, разработана главным образом для горизонтально-слоистых разрезов, с которыми мы встречаемся чаще всего в платформенных условиях в районах развития пород осадочного чехла.

Вид кривых вертикального электрического зондирования зависит от числа горизонтальных слоев, слагающих разрез, и соотношений между их удельными сопротивлениями и мощностями.

Различают двухслойный, трехслойный, четырехслойный геоэлектрические разрезы и др. Двухслойный разрез (рис. 41, а) характеризуется следующими параметрами: мощностью верхнего слоя h_1 , его удельным сопротивлением ρ_1 и удельным сопротивлением

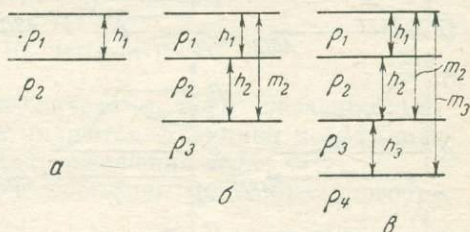


Рис. 41. Геоэлектрические разрезы.
а — двухслойный; б — трехслойный; в — четырехслойный.

подстилающей безграничной по мощности среды ρ_2 ; трехслойный разрез (рис. 41, б) отличается уже пятью параметрами: h_1, h_2, ρ_1, ρ_2 и ρ_3 , четырехслойный (рис. 41, в) — семью параметрами: $h_1, h_2, h_3, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ и т. д. Согласно приведенным типам разрезов различают двухслойные, трехслойные, четырехслойные кривые ВЭЗ и др. (рис. 42). В общем случае кривые ВЭЗ являются функцией параметров разреза, а также полуразноса питающих электродов AB (или $L/2$), т. е.

$$\rho_k = f\left(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, h_1, h_2, h_3, \dots, \frac{AB}{2}\right). \quad (\text{IV.1})$$

Чтобы получить уравнение кривой, соответствующей разрезу с тем или иным числом слоев, воспользуемся выражениями для напряженности поля точечного источника:

$$E = -dU/dr = I\rho/2\pi r^2,$$

откуда

$$\rho = E2\pi r^2/I.$$

При измерениях установкой AMNB, имеющей два питающих заземления, напряженность поля удваивается, т. е.

$$E = I\rho/\pi r^2,$$

и поэтому

$$\rho = E\pi r^2/I.$$

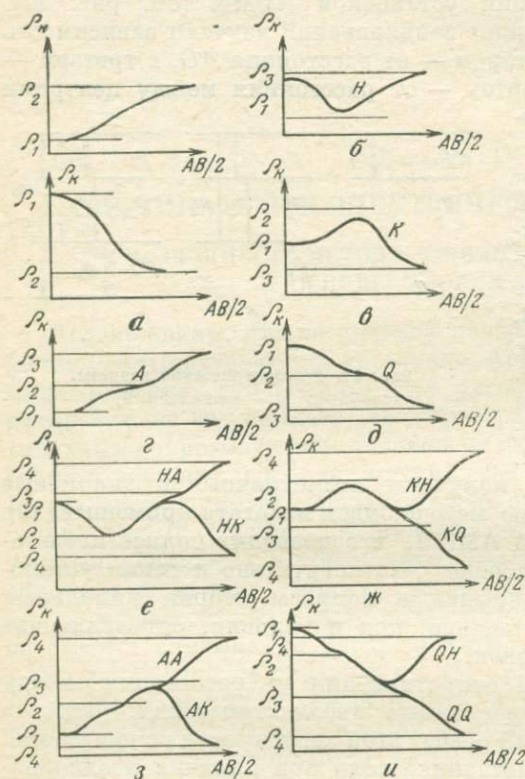


Рис. 42. Кривые ВЭЗ.

а — двухслойные; б — трехслойная типа H; в — трехслойная типа A; г — трехслойная типа Q; е—и — четырехслойные кривые.

При достаточно малом значении разноса $MN = l$ измеряемая величина ΔU практически эквивалентна E .

Если среда однородна, то при измерении установками метода сопротивлений получаем величину истинного удельного сопротивления среды. Для неоднородной же среды имеем значение кажущегося сопротивления, т. е.

$$\rho_k = E\pi r^2/I. \quad (\text{IV.2})$$

Выражение (II.25) напряженности поля для двухслойной среды на поверхности земли подставим в формулу (IV.2), заменив при этом r на $L/2$ (полуразнос питающих электродов).

Получим уравнение двухслойной кривой ВЭЗ:

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n (L/2)^3}{[(L/2)^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (IV.3)$$

Аналогичным путем можно получить уравнение трехслойной кривой ВЭЗ. Ввиду сложности выражения E для трехслойной среды и последующих выкладок приведем уравнение трехслойной кривой в окончательном виде:

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_n (L/2h)^3}{[(L/2h)^2 + (n)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (IV.4)$$

Стоящие под знаком суммы множители q_n носят название эмиссионных коэффициентов, которые являются функцией коэффициентов отражения k_{12} и k_{23} , а также отношения $h_2/h_1 = \nu_1$.

Выражения для коэффициентов отражения могут быть преобразованы:

$$k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1},$$

$$k_{23} = \frac{\rho_3 - \mu_1 \rho_1}{\rho_3 + \mu_1 \rho_1} = \frac{\rho_3 - \mu_1}{\rho_3 + \mu_1} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1};$$

здесь

$$\mu_1 = \rho_2/\rho_1; \quad \mu_2 = \rho_3/\rho_1.$$

Величины μ_1 , μ_2 , ν_1 носят название модулей разреза. Поскольку коэффициент отражения k_{12} есть функция модуля μ_1 , а коэффициент k_{23} — функция модулей μ_1 и μ_2 , выражения (IV.3) и (IV.4) для двухслойной и трехслойной кривых ВЭЗ можно представить в более общем виде:

$$\rho_k/\rho_1 = f(\rho_2/\rho_1, AB/2h_1), \quad (IV.5)$$

$$\rho_k/\rho_1 = f(\rho_2/\rho_1, \rho_3/\rho_1, h_2/h_1, AB/2h_1). \quad (IV.6)$$

Если задаться какими-либо численными значениями мощностей и сопротивлений горизонтов, слагающих разрез, то зависимость кажущегося удельного сопротивления от разнаса питающих электродов выразится кривой вида

$$\rho_k = \rho_1 F(AB/2h_1). \quad (IV.7)$$

Горизонтальные асимптоты. Типы кривых ВЭЗ. Пользуясь выражениями (IV.3) и (IV.4), рассмотрим поведение кривых ВЭЗ в зависимости от разнаса $L/2$.

Можно видеть, что при уменьшении $L/2$ выражение, стоящее в фигурных скобках под знаком суммы, также уменьшается и при $L/2 \rightarrow 0$ обращается в нуль. Следовательно,

$$\lim_{L/2 \rightarrow 0} \rho_k = \rho_1,$$

т. е. кривые ВЭЗ в левой части с уменьшением разносов питающих заземлений асимптотически приближаются к прямой $\rho_k = \rho_1$ (рис. 42).

Характер кривой зондирования при весьма больших значениях разноса $L/2$ проще всего установить для двухслойного разреза. Уравнение (IV.3) при $L/2 \rightarrow \infty$ будет иметь следующий вид:

$$\lim_{L/2 \rightarrow \infty} \rho_k = \rho_1 \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} k_{12}^n \right] = \rho_1 [1 + 2(k_{12} + k_{12}^2 + k_{12}^3 + \dots)].$$

Выражение в круглых скобках представляет собой убывающую геометрическую прогрессию (так как k_{12} всегда меньше 1), поэтому

$$\lim \rho_k = \rho_1 \left[1 + 2 \frac{k_{12}}{1 - k_{12}} \right] = \rho_1 \frac{1 + k_{12}}{1 - k_{12}} = \rho_2,$$

т. е. с увеличением $L/2$ кривая ВЭЗ асимптотически стремится к прямой $\rho_k = \rho_2$ (рис. 42, а).

В соответствии с этим можно сказать, что двухслойные кривые зондирования могут быть двух типов: с правой восходящей ветвью, отвечающей условию $\rho_2 > \rho_1$ (т. е. когда $\mu_1 > 1$), и правой нисходящей ветвью, когда $\rho_2 < \rho_1$ (т. е. $\mu_1 < 1$).

Трехслойные кривые могут быть четырех типов. Действительно, если второй пласт обладает не бесконечной, как в двухслойном разрезе, а конечной мощностью h_2 , то при разносах $AB \gg (h_1 + h_2)$ на распространение тока начнет влиять третий пласт. И в зависимости от того, в каком соотношении находятся удельные сопротивления ρ_2 и ρ_3 второго и третьего пластов, кажущееся удельное сопротивление ρ_k будет возрастать (при $\rho_3 > \rho_2$) или уменьшаться (при $\rho_3 < \rho_2$) и в пределе достигнет значения ρ_3 . Каждому типу трехслойных кривых и соответствующим им разрезам присвоен определенный символ или индекс. Кривые первого типа соответствуют разрезу с соотношением удельных сопротивлений пластов $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$. Кривые и разрезы этого типа обозначаются индексом Н (рис. 42, б).

Трехслойные кривые второго типа обозначаются индексом К (рис. 42, в) и соответствуют разрезам, у которых второй пласт обладает более высоким сопротивлением, чем вышележащий и подстилающий пласты, а именно: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$.

Кривые третьего типа отвечают разрезам с возрастанием сопротивления пластов с глубиной и имеют индекс А (рис. 42, г): $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Наконец, кривые четвертого типа, обозначаемые индексом Q, соответствуют тем разрезам, у которых с глубиной сопротивление пластов падает (рис. 42, д): $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$.

Четырехслойные кривые подразделяются уже на восемь типов: каждый тип обозначается индексами из двух букв. Первая буква соответствует индексу трехслойного разреза, образованному слоями ρ_1, ρ_2 и ρ_3 , вторая — индексу трехслойного разреза, представленного слоями ρ_2, ρ_3 и ρ_4 . Различают следующие типы четырехслойных кривых (рис. 42, *e, u*): НК, НА, КН, КQ, АА, АК, QQ, QH.

Влияние изменений параметров разрезов на форму кривых ВЭЗ. Рассмотрим поведение кривых ВЭЗ в зависимости от изменения параметров h_1, ρ_1 и ρ_2 двухслойного разреза. На рис. 43 приведены двухслойные кривые, полученные над разрезами при $\rho_2 > \rho_1$. Рис. 43, *a* соответствует тому случаю, когда разрез в двух точках

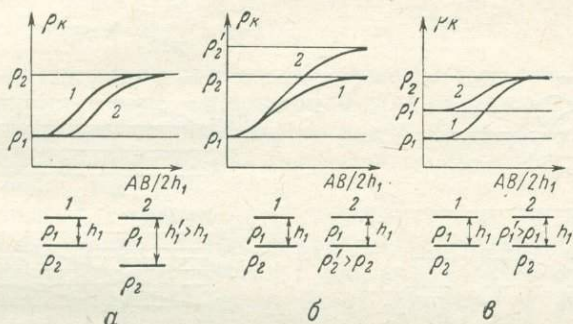


Рис. 43. Влияние различий в параметрах разреза на форму кривых ВЭЗ.

зондирования различается только мощностью верхнего слоя. В точке, где мощность верхнего слоя больше, подъем кривой 2 начинается при больших значениях разноса питающих заземлений, чем подъем кривой 1, так как с увеличением глубины залегания нижнего слоя его влияние на значения ρ_k будет сказываться при все больших разносах. Поскольку у обоих разрезов удельные сопротивления соответствующих слоев одинаковы, левые и правые асимптоты обеих кривых общие. На рис. 43, *б* кривые 1 и 2 отвечают разрезам с различным удельным сопротивлением подстилающего слоя. Так как параметры верхнего слоя в обоих случаях одинаковы, подъем у обеих кривых начинается при одинаковых разносах; но так как $\rho_2' > \rho_2$, правая асимптота кривой 2 располагается выше, чем кривой 1.

Различие разрезов по удельному сопротивлению верхнего слоя обуславливает, как это показано на рис. 43, *в*, только смещение левых асимптот по вертикали.

Аналогичные рассуждения позволяют получить представление о влиянии параметров многослойных разрезов на форму соответствующих им кривых ВЭЗ. Ограничимся рассмотрением только одного примера для разреза типа К. Предположим, что разрезы в трех точках различаются только по мощности h_2 второго (промежуточного) горизонта. Тогда этот горизонт будет проявляться,

очевидно, максимумом ρ_k на кривой ВЭЗ тем отчетливее, чем больше его мощность. Соответственно уменьшение ρ_k за счет влияния третьего слоя будет начинаться при все больших разностях питающих заземлений. Поскольку сопротивление верхнего и подстилающего горизонтов во всех трех точках одинаково, все три кривые имеют общие левые и правые асимптоты (рис. 44).

Изображение кривых ВЭЗ. Логарифмический масштаб. Билогарифмические сетки. Кривые вертикального электрического зондирования изображают в прямоугольных координатах на двойной логарифмической (билогарифмической) сетке. По осям координат откладывают не сами числа, а их десятичные логарифмы. Чтобы

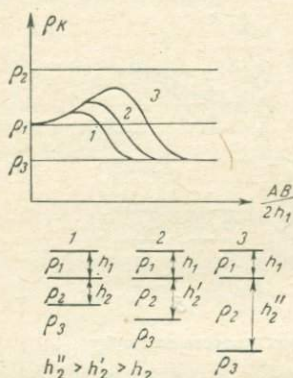


Рис. 44. Влияние изменения мощности промежуточного (второго) слоя на форму кривых типа К.

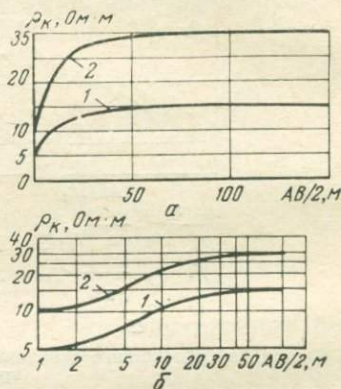


Рис. 45. Кривые ВЭЗ в различных масштабах. Двухслойные кривые: а — в обычном линейном масштабе, б — в билогарифмическом масштабе; 1 — кривая для разреза: $\rho_1 = 5$, $\rho_2 = 15$, $\mu_1 = 3$; 2 — кривая для разреза: $\rho_1 = 10$; $\rho_2 = 30$, $\mu_1 = 3$.

найти отрезок, соответствующий данному числу в логарифмическом масштабе, надо прологарифмировать число и умножить его логарифм на некоторый постоянный коэффициент M , называемый модулем логарифмического масштаба:

$$l_x = M \lg x,$$

где l_x — длина искомого отрезка.

Если $x = 10$, то

$$l_{10} = M \lg 10 = M,$$

т. е. модуль M есть длина отрезка, соответствующего $\lg 10$. Для изображения кривых зондирования модуль M принимают равным 6,25 см.

При построении кривых ВЭЗ по оси абсцисс обычно откладывают полуразнос питающих заземлений $AB/2$, а по оси ординат — значения ρ_k .

Следует иметь в виду, что иногда удобно ось полуразносов направлять вниз, а ось ρ_k — горизонтально. Мы примем первый из названных способов ориентировки координатных осей в качестве основного.

Билогарифмический масштаб удобен тем, что значительно упрощает интерпретацию кривых ВЭЗ, так как интерпретацию выполняют путем сопоставления полученных в поле кривых ВЭЗ с теоретически рассчитанными по формулам (IV.3) и (IV.4) кривыми.

Если изобразить в обычном масштабе две кривые ВЭЗ с одинаковым значением $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, но различной величиной ρ_1 , кривые будут значительно отличаться одна от другой (рис. 45, а).

Прологарифмируем выражение (IV.6):

$$\lg \rho_k = \lg \rho_1 + \lg f(\mu_1, \mu_2, \nu_1, AB/2h_1). \quad (IV.8)$$

В этом случае форма кривых ВЭЗ уже не будет зависеть от величины ρ_1 ; действительно, теперь кривые для разрезов с одинаковыми значениями модулей, но различными значениями ρ_1 будут подобны и лишь смещены по оси ординат относительно друг друга на отрезок, равный величине $\lg \rho_1$ (рис. 45, б).

Таким образом, применение логарифмического масштаба позволяет уменьшить число необходимых теоретических кривых, так как их форма не будет зависеть от абсолютных значений ρ_1 .

Если прологарифмировать аргумент функции F в уравнении (IV.7), то уравнение примет вид

$$\lg \rho_k = \lg \rho_1 + \lg \varphi [\lg (AB/2) - \lg h_1]. \quad (IV.9)$$

Из этого выражения следует, что форма кривой зондирования, построенной на двойной логарифмической сетке, уже не будет зависеть и от мощности верхнего слоя h_1 ; при изменении h_1 кривая будет лишь смещаться вправо или влево вдоль оси абсцисс.

Примем во внимание еще одно обстоятельство. Поскольку по оси абсцисс билогарифмического бланка откладываются линейные величины, а по оси ординат — сопротивление, то координаты x_P и y_P любой точки P бланка имеют размерность соответственно метры (м) и ом-метры (Ом·м), т. е. отвечают параметрам некоторого пласта. Отсюда следует и обратное заключение — каждому пласту с параметрами h_p и ρ_p отвечает точка P бланка с координатами $x_P = h_p$ и $y_P = \rho_p$.

Обобщенные параметры разреза. Эквивалентные слои. Прежде чем перейти к рассмотрению теоретических кривых, познакомимся с некоторыми понятиями, имеющими большое значение в теории и интерпретации кривых зондирования.

Как указывалось выше, при переходе из хорошо проводящего пласта в пласт относительно повышенного сопротивления ток стремится течь перпендикулярно к границам пласта, а при переходе в более проводящий пласт — по направлению напластования. Это позволяет ввести понятие о поперечном сопротивлении и продольной проводимости пласта.

Под продольной проводимостью S одиночного пласта понимается проводимость объема породы в виде квадратной призмы с площадью основания s , равной 1 м^2 , и высотой, равной мощности пласта, в направлении, перпендикулярном к одной из боковых граней этой призмы (рис. 46, а).

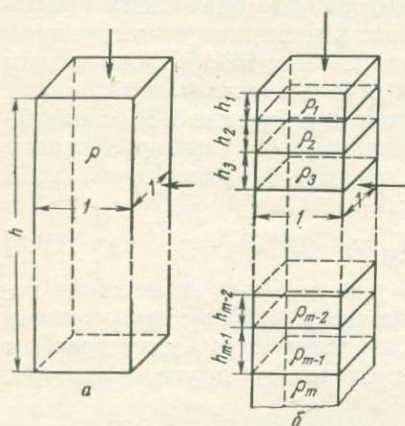


Рис. 46. Пояснение к расчету обобщенных параметров.
а — для одиночного пласта; б — для многослойного разреза.

а — для одиночного пласта; б — для многослойного разреза. В данном случае

Согласно известному соотношению сопротивление призмы R определится следующим образом:

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{1}{h \cdot 1} = \frac{\rho}{h}. \quad (\text{IV.10})$$

Тогда для продольной проводимости S можно написать выражение

$$S = 1/R = h/\rho. \quad (\text{IV.11})$$

Продольная проводимость S измеряется в сименсах ($1 \text{ См} = = \text{Ом}^{-1}$).

Под поперечным сопротивлением T одиночного пласта понимается сопротивление той же призмы в направлении от одного основания призмы к другому, т. е. перпендикулярно к границам пласта.

$$T = \rho \frac{l}{s} = \rho \frac{h}{1 \cdot 1} = \rho h. \quad (\text{IV.12})$$

Определив S и T , можно вычислить параметры пласта h и ρ . Действительно, решая совместно уравнения (IV.11) и (IV.12), получаем:

$$h = \sqrt{ST}, \quad (\text{IV.13})$$

$$\rho = \sqrt{T/S}. \quad (\text{IV.14})$$

Понятие продольной проводимости и поперечного сопротивления можно использовать также для характеристики многослойного разреза.

Пусть разрез сложен m пластами с сопротивлением $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_m$ и мощностью $^1 h_1, h_2, h_3, \dots, h_{m-1}$. Вырежем в таком разрезе квадратную призму высотой $h = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_{m-1}$ и с площадью основания, равной 1 м^2 (рис. 46, б). Пропустим через эту призму ток вдоль напластования. Проводимость призмы, представляющей собой систему параллельно включенных

¹ В электроразведке мощность подстилающего m -го пласта принято считать бесконечно большой.

сопротивлений, может быть подсчитана как сумма проводимостей отдельных пластов:

$$S = \frac{h_1 \cdot 1}{\rho_1 \cdot 1} + \frac{h_2 \cdot 1}{\rho_2 \cdot 1} + \frac{h_3 \cdot 1}{\rho_3 \cdot 1} + \dots + \frac{h_{m-1} \cdot 1}{\rho_{m-1} \cdot 1} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{h_i}{\rho_i} = \sum_{i=1}^{m-1} S_i.$$

Можно утверждать, что в том случае, когда ток распространяется вдоль напластования, распределение его в горизонтах, подстилающих и перекрывающих пачку пластов, не изменится, если эту пачку пластов заменить однородным пластом с той же продольной проводимостью и мощностью h , равной суммарной мощности $\sum h_i$ слоистой пачки. Такой пласт называют эквивалентным, и ему приписывают некоторое промежуточное значение удельного сопротивления, которое обозначают через ρ_l и называют продольным сопротивлением слоистого разреза.

Продольная проводимость эквивалентного однородного пласта

$$S = h/\rho_l = \sum_{i=1}^{m-1} S_i,$$

откуда

$$\rho_l = h \left/ \sum_{i=1}^{m-1} S_i \right. = \sum_{i=1}^{m-1} h_i \left/ \sum_{i=1}^{m-1} S_i \right. \quad (\text{IV.15})$$

Аналогичные рассуждения можно провести относительно поперечного сопротивления T совокупности пластов, через которые ток течет перпендикулярно к напластованию. Поперечное сопротивление такой пачки пластов

$$T = \frac{h_1 \rho_1}{1 \cdot 1} + \frac{h_2 \rho_2}{1 \cdot 1} + \dots + \frac{h_{m-1} \rho_{m-1}}{1 \cdot 1} = \sum_{i=1}^{m-1} h_i \rho_i = \sum_{i=1}^{m-1} T_i.$$

И в данном случае слоистый разрез можно заменить однородным (эквивалентным) пластом мощностью $h = \sum h_i$ с условием, если он будет обладать тем же поперечным сопротивлением T . При этом эквивалентный пласт должен обладать некоторым удельным сопротивлением ρ_n , называемым поперечным удельным сопротивлением.

Следовательно,

$$T = h \rho_n = \sum_{i=1}^{m-1} T_i,$$

откуда

$$\rho_n = \sum_{i=1}^{m-1} T_i \left/ \sum_{i=1}^{m-1} h_i \right. \quad (\text{IV.16})$$

Можно доказать, что ρ_n всегда больше ρ_l . Это означает, что слоистая среда всегда обладает анизотропией по отношению к электрическому току. В отличие от микроанизотропии анизотропию такого

рода, т. е. анизотропию, обусловленную слоистостью среды, называют макроанизотропией. Степень анизотропности среды определяется коэффициентом макроанизотропии λ :

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}} = \sqrt{\frac{\frac{\sum T_i}{\sum h_i}}{\frac{\sum h_i}{\sum S_i}}} = \frac{\sqrt{ST}}{\sum h_i} \quad (IV.17)$$

Для анизотропных пород вводят также понятие о среднем квадратичном удельном сопротивлении

$$\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_n}, \quad (IV.18)$$

которое связано с коэффициентом макроанизотропии соотношениями

$$\lambda = \rho_n / \rho_m = \rho_m / \rho_l.$$

Прямые S и T . Понятие об особых точках. Выражения (IV.11) и (IV.12) представляют собой уравнения, связывающие переменные величины h и ρ при постоянных S и T .

Прологарифмируем эти уравнения:

$$\lg h = \lg \rho + \lg S, \quad (IV.19)$$

$$\lg h = -\lg \rho + \lg T. \quad (IV.20)$$

В билогарифмическом масштабе графики этих выражений представляют собой прямые линии с угловыми коэффициентами, равными соответственно $+1$ и -1 . Первая прямая является геометрическим местом точек, координаты которых представляют собой удельное сопротивление и мощность пластов с постоянной продольной проводимостью, и называется прямой S . Вторая прямая есть геометрическое место точек, координаты которых являются удельным сопротивлением и мощностью пластов, обладающих одним и тем же поперечным сопротивлением. Эта прямая носит название прямой T .

Прямая S идет под углом 45° к оси абсцисс вверх направо, прямая T — под углом 135° вверх налево (рис. 47). Приняв в уравнениях (IV.19) и (IV.20) $\rho = 1$, найдем, что прямые S и T пересекают горизонтальную линию 1 на бланке в точках, абсциссы которых численно равны соответственно $\lg S$ и $\lg T$. Это позволяет легко установить следующее правило построения прямых S и T : на горизонтальной линии 1 билогарифмического бланка нужно отложить значения S и T и провести прямые под углом соответственно 45 и 135° .

Точка пересечения A прямых S и T дает графическое решение системы уравнений (IV.19) и (IV.20). Координаты точки A соответ-

ствують мощности и удельному сопротивлению пласта с заданными значениями S и T .

В том случае, когда величины S и T характеризуют слоистый анизотропный разрез, по точке A можно определить параметры h_3 и ρ_3 такого однородного слоя, который эквивалентно замещает данный анизотропный разрез. В связи с этим точку A называют точкой анизотропии.

В частности, если разрез сложен тремя слоями, величины S и T находят следующим образом:

$$S = S_1 + S_2 = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2,$$

$$T = T_1 + T_2 = h_1\rho_1 + h_2\rho_2.$$

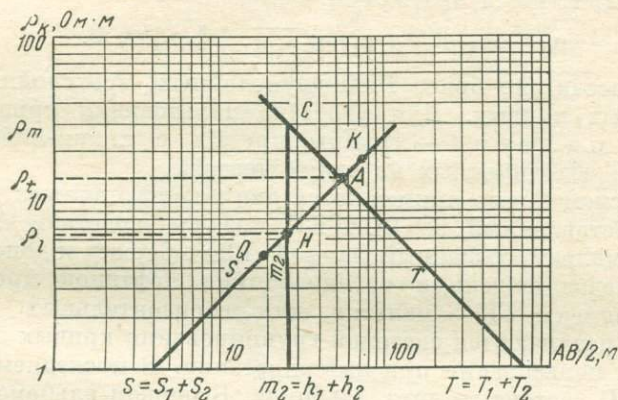


Рис. 47. Линии S и T и особые точки.

Проведем на бланке кроме прямых S и T еще прямую $x = h_1 + h_2 = m_2$. На пересечении этой прямой с прямой S лежит точка H — точка Гуммеля. Ее координаты можно получить, решив совместно уравнения прямых S и m_2 , а именно:

$$x_H = h_1 + h_2, \quad y_H = (h_1 + h_2)/(S_1 + S_2) = \rho_l;$$

таким образом, координаты точки Гуммеля также представляют собой параметры слоя, который эквивалентно заменяет двухслойный разрез и имеет мощность $h_3 = h_1 + h_2$ и удельное сопротивление $\rho_3 = \rho_l$.

На прямой S расположены еще две особые точки — Q и K , смещенные относительно точек H и A на некоторые расстояния $m = HQ$ и $p = AK$. Эти точки получили наименование соответственно смещенной точки Гуммеля и смещенной точки анизотропии. Их координаты также соответствуют параметрам некоторых эквивалентных слоев. Все эти точки используются при интерпретации кривых ВЭЗ, а также при графическом построении их по заданным параметрам разреза.

Палетки кривых ВЭЗ. Форма кривых ВЭЗ, как показано выше, определяется не удельным сопротивлением и мощностью каждого пласта, а модулями $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$, $\nu_1 = h_2/h_1$, $\nu_2 = h_3/h_1$ и т. д.

Величины h_1 и ρ_1 для теоретических кривых приняты равными единице.

Двухслойные кривые рассчитаны для следующих значений μ_1 : 0; 1/999; 1/399; 1/199; 1/99; 1/39; 1/19; 1/9; 1/7; 1/5; 1/4; 1/3; 3/7; 1/2; 2/3; 9/11; 11/9; 3/2; 13/7; 2; 7/3; 3; 4; 5; 17/3; 7; 9; 39; 99.

Трехслойные кривые определяются уже тремя модулями — μ_1 , μ_2 и ν_1 . Они рассчитаны для следующих значений модулей: μ_1 — 39; 19; 9; 4; 7/3; 3/2; 2/3; 3/7; 1/4; 1/9, 1/39; 1/100; 1/300; ν_1 — 24; 9; 5; 3; 2; 1; 1/2; 1/3; 1/5; 1/9;

$$\mu_2 - \infty, \rho_2^2/\rho_1, \rho_1, \sqrt{\rho_1\rho_2}, (\rho_2^3/\rho_1)^{1/2}, 0.$$

Всего рассчитано более 1000 двухслойных, трехслойных и четырехслойных кривых. Для удобства пользования кривыми они собраны в палетки — группы кривых с каким-либо общим параметром, объединенных на одном чертеже.

В Советском Союзе применяются два набора палеток: комплект палеток, составленный во ВСЕГЕИ под руководством А. М. Пылаева, и комплект, созданный фирмой «Шлюмберже» и дополненный научно-исследовательскими организациями нефтяной промышленности (комплект ГП — палетки для горизонтальных пластов). Комплекты различаются системой группирования кривых в палетки и приемами пользования при интерпретации. В последнем издании комплект ГП состоит из двух альбомов. В первом альбоме собраны двухслойные и трехслойные кривые ВЭЗ, во втором — четырехслойные кривые. Мы остановимся на применении комплекта палеток ВСЕГЕИ (А. М. Пылаева).

Двухслойные кривые комплекта собраны в одну палетку, получившую наименование палетки ρ_2 (рис. 48). Кривые, расположенные над осью абсцисс, соответствуют значениям $\mu_1 > 1$, кривые, находящиеся ниже оси абсцисс, — значениям $\mu_1 < 1$ (в комплекте ГП эти кривые собраны в две палетки — отдельно для $\mu_1 > 1$ и $\mu_1 < 1$). Значения модуля ν_1 каждой кривой написаны в кружочках. Точка пересечения оси абсцисс с осью ординат называется крестом палетки.

На палетке видно, что кривые модуля $\mu_1 < 1$ уже с небольших значений $AB/2$ резко идут вниз, а при $AB/2 \approx 10h_1$ значения ρ_k достигают величины ρ_2 .

Кривые модуля $\mu_1 > 1$ поднимаются медленнее. Даже при $AB/2 = 100h_1$ значения ρ_k составляют всего лишь 90% величины $\rho_2 = 19\rho_1$, 72% величины $\rho_2 = 39\rho_1$ и 50% величины $\rho_2 = 99\rho_1$. Следовательно, проводящие горизонты проявляются на кривых зондирования более резко, чем горизонты повышенного сопротивления. Обращает на себя внимание, что кривая для $\mu_1 = 0$, т. е. для идеально проводящего подстилающего горизонта, почти вертикально

уходит в отрицательную бесконечность ($\lg \rho_2 = \lg 0 = -\infty$), в то время как кривая для противоположного случая — изолирующего подстилающего горизонта ($\mu_1 = \infty$), начиная примерно с $AB/2 = 2h_1$, асимптотически приближается к прямой линии, наклоненной под углом 45° к оси абсцисс.

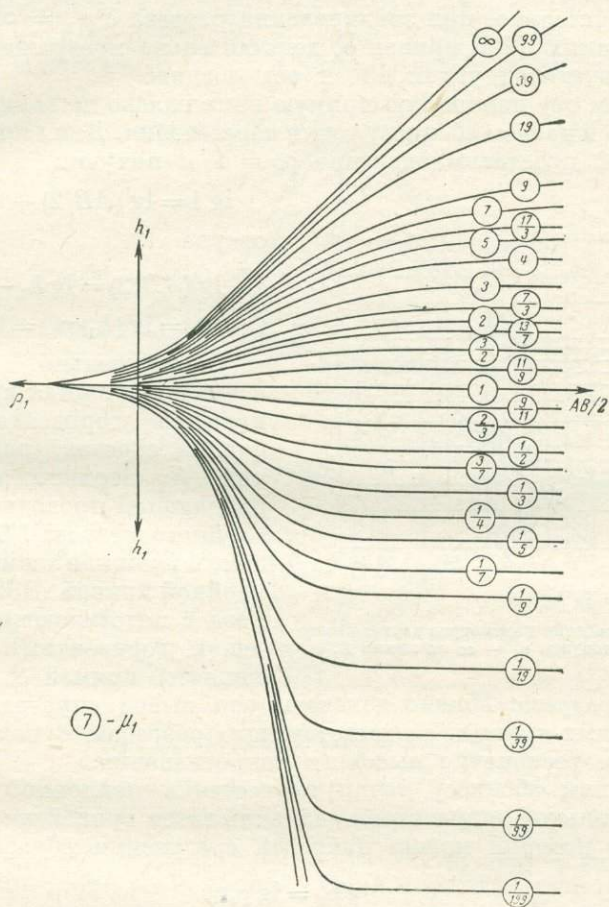


Рис. 48. Двухслойная палетка ρ_2 .

Если учесть, что в двухслойном разрезе, характеризующемся модулем $\mu_1 = \infty$, электрический ток распределяется только в верхнем, проводящем, горизонте, то становится очевидным, что на значительном удалении от питающих заземлений ток течет параллельно напластованию. Тогда можно доказать, что на достаточно больших разносах AB

$$\rho_k = \frac{\rho_1}{h_1} \frac{AB}{2}.$$

Логарифмируя последнее выражение, получим

$$\lg \rho_k = \lg (AB/2) + \lg (\rho_1/h_1). \quad (IV.21)$$

На билогарифмической сетке график этого уравнения представляет собой прямую линию с угловым коэффициентом, равным +1. Следовательно, при зондировании разреза с $\mu_1 = \infty$ при больших значениях $AB/2$ кривая ρ_k действительно превращается в прямую, идущую под углом 45° к оси абсцисс.

Продлим эту наклонную прямую вниз налево до горизонтальной оси бланка и найдем абсциссу точки пересечения. Для этого в уравнение (IV.21) подставим значение $\rho_k = 1$ и получим

$$\lg 1 = \lg (AB/2) + \lg (\rho_1/h_1),$$

откуда

$$\begin{aligned} \lg (AB/2) &= \lg h_1 - \lg \rho_1 = \\ &= \lg (h_1/\rho_1) = \lg S_1. \end{aligned}$$

Следовательно, рассматриваемая наклонная прямая отсекает на горизонтальной оси бланка отрезок, равный величине S_1 верхнего слоя (т. е. продольной проводимости двухслойного разреза). Таким образом, наклонная асимптота двухслойной кривой ВЭЗ для разреза с подстилающим изолирующим горизонтом фактически является прямой S этого двух-

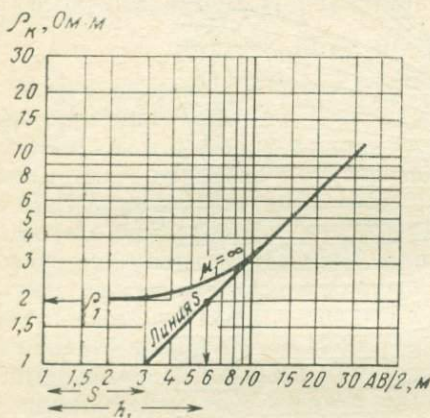


Рис. 49. Определение параметров двухслойного разреза с модулем $\mu_1 = \infty$ по линии S .

слойного разреза. Можно доказать, что вывод справедлив и для многослойных кривых, соответствующих разрезам с подстилающим горизонтом бесконечно высокого сопротивления.

Определим абсциссу точки пересечения наклонной асимптоты с горизонтальной асимптотой начальной ветви кривой зондирования, уравнение которой можно написать следующим образом:

$$\lg \rho_k = \lg \rho_1. \quad (IV.22)$$

Решая совместно уравнения (IV.21) и (IV.22), находим, что

$$\lg (AB/2) = \lg h_1,$$

т. е. наклонная асимптота двухслойной кривой для $\mu_1 = \infty$ на левой горизонтальной асимптоте отсекает отрезок, равный мощности верхнего слоя h_1 (рис. 49).

Трехслойные кривые ВЭЗ в комплекте ВСЕГЕИ собраны в 72 палетки, размещенные на 28 листах и сброшюрованные в альбом (двухслойная палетка ρ_2 помещена на первом листе этого же альбома).

Палетки разделены на четыре серии, соответствующие четырем типам трехслойных кривых.

Кривые сгруппированы так, что в пределах палетки они имеют одно значение μ_1 и μ_2 и различаются лишь по модулю ν_1 . Каждой палетке присвоен определенный индекс, обозначающий тип кривых и значения ρ_2/ρ_1 и ρ_3/ρ_1 . Так, например, индекс $(H - 1/4 - \rho_1)$ обозначает, что данная палетка содержит кривые типа H с модулем $\mu_1 = 1/4$ и значением $\rho_3 = \rho_1$. Следует иметь в виду, что палетки

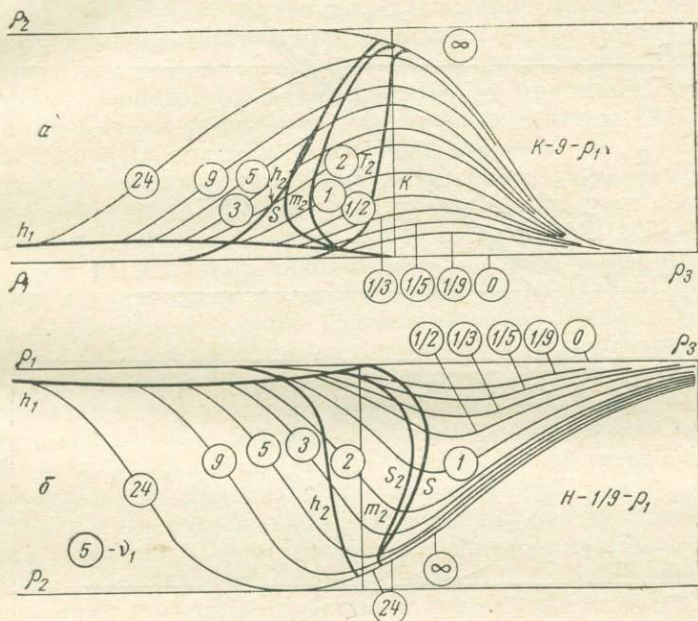


Рис. 50. Трехслойные палетки ВСЕГЕИ.
а — типа К; б — типа Н.

рассчитаны для $\rho_1 = 1$, поэтому значения модуля μ_2 в индексах палеток пишутся следующим образом: ∞ , ρ_2^2 , ρ_1 , $\sqrt{\rho_2}$, $\rho_2^{3/2}$, 0.

Численные значения модуля ν_1 , для которого рассчитаны отдельные кривые палетки, указаны около этих кривых. На рис. 50 и 51 изображены четыре трехслойные палетки из альбома ВСЕГЕИ. На каждой палетке проведены горизонтальные асимптоты ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 . Наклонные асимптоты, соответствующие разрезам, у которых $\rho_3 = \infty$, проведены на палетках типа А (рис. 51, а); на палетках же типа Н они определяются положением правых ветвей теоретических кривых зондирования. Указанные асимптоты являются общими для кривых, входящих в ту или иную палетку.

Кривые типа Н расположены в пределах палетки так, что их точки Н имеют общую абсциссу, т. е. располагаются на одной вертикальной линии. Эта линия обозначена на палетках символом

m_2 (напомним, что точка H имеет абсциссу $x_H = h_1 + h_2 = m_2$). По такому же принципу совмещены по точкам K кривые типа K и по точкам Q кривые типа Q . Кривые типа A совмещены на палетках иначе, а именно: все они имеют общую прямую S .

На палетки нанесены вспомогательные линии h_1 , h_2 и $m_2 = h_1 + h_2$, представляющие собой геометрические места точек

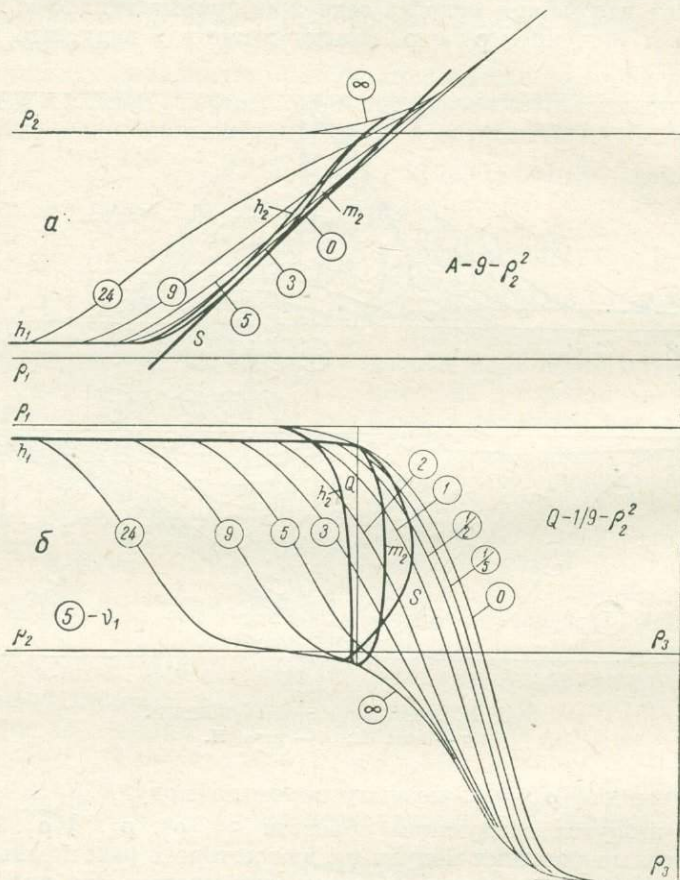


Рис. 51. Трехслойные палетки ВСЕГЕИ.
а — типа А; б — типа Q.

пересечения теоретических кривых зондирования с абсциссами, значения которых равны мощности пластов, составляющих тот разрез, которому отвечает теоретическая кривая ρ_k (на палетках серии H линия m_2 совпадает с прямой, являющейся геометрическим местом точек H). Иначе говоря, абсциссы точек пересечения какой-либо кривой ρ_k палетки с линиями h_1 , h_2 и m_2 соответствуют значениям мощностей первого слоя h_1 , второго слоя h_2 и глубины залегания кровли третьего слоя m_2 для данной кривой. На палетках

проведено еще несколько вспомогательных линий: линии S и S_2 на палетках серии Н, линия S на палетках серии Q, линии T_2 и S на палетках серии К. Эти линии представляют собой геометрические места точек пересечения палеточных кривых с соответствующими прямыми S , S_2 и T_2 , что дает возможность определять положение этих прямых. Если, например, через точку пересечения какой-либо кривой ρ_k с линией S провести прямую под углом 45° вверх направо, то она будет являться прямой S данного разреза. Это позволяет в процессе интерпретации находить значения продольной проводимости S для всего трехслойного разреза, а также продольной проводимости S_2 и поперечного сопротивления T_2 для второго слоя.

Четырехслойные кривые собраны в отдельный альбом комплекта ГП, палетки которого составлены по тому же принципу, что и для трехслойных кривых комплекта ГП. Пока рассчитаны 122 палетки для трех вариантов значений ρ_4 : ∞ , 0 и $16\rho_1$.

Дипольные зондирования. При выполнении дипольного зондирования измерения ρ_k проводят, как указано выше, при постепенно возрастающем расстоянии между центрами диполей (перемещается обычно один из диполей: либо питающий, либо измерительный). Условимся в дальнейшем называть осями питающего и приемных диполей линии, соединяющие соответствующие заземления, осью установки или осью зондирования — линию, проходящую через центры O и O' питающего и приемного диполей. Дипольные установки характеризуются следующими параметрами: AB и MN — длиной питающего и приемного диполей, r — расстоянием между центрами диполей, θ — углом между осями диполя AB и установки, γ — углом между осями диполя MN и зондирования.

В настоящее время практически применение получили дипольные установки трех видов: азимутальная, экваториальная и осевая радиальная. При помощи азимутальной и экваториальной установок измеряют величину E_θ , осевой радиальной — величину E_r . Дипольные зондирования принято называть соответственно установке, которой они выполняются: дипольно-азимутальное зондирование ДАЗ, дипольно-осевое зондирование ДОЗ, дипольно-экваториальное ДЭЗ и т. п. (Если же речь идет о дипольном зондировании вообще безотносительно к типу установки, его сокращенно обозначают ДЗ.)

Чтобы получить уравнения кривых дипольного зондирования, воспользуемся решениями, которые были получены ранее для поля точечного источника при наличии горизонтальных поверхностей раздела (см. гл. II), а на этой основе — для зондирований с симметричной установкой $AMNB$ (гл. IV, § 1). Очевидно, что ход решения задачи для данной установки должен быть таким же.

Сравнив выражение для потенциала диполя U_d (II.6) и потенциала точечного источника U_M (II.1) в однородной среде, можно заключить, что

$$U_d = - \frac{dU_M}{dr} l \cos \theta.$$

Аналогичная связь существует между потенциалами поля точечного источника и поля диполя в горизонтально-слоистой среде. Это дает возможность получить выражение потенциала поля диполя на поверхности земли над горизонтальным двухслойным разрезом, продифференцировав почленно уравнение (II.24) для потенциала точечного источника и умножив его на $l \cos \theta$:

$$U_d = \frac{I\rho_1}{2\pi} l \cos \theta \left\{ \frac{1}{r^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n r}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (IV.23)$$

Зная U_d , можно в соответствии с формулами (II.7) и (II.8) составить выражения для азимутальной и радиальной составляющих напряженности поля диполя на поверхности земли над двухслойным разрезом:

$$E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{dU_d}{d\theta} = \frac{I\rho_1}{2\pi} l \sin \theta \left\{ \frac{1}{r^3} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right\}, \quad (IV.24)$$

$$E_r = -\frac{dU_d}{dr} = 2 \frac{I\rho_1}{2\pi} l \cos \theta \left\{ \frac{1}{r^3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n [2r^2 - (2nh_1)^2]}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{5/2}} \right\}. \quad (IV.25)$$

Из уравнений (II.7) и (II.8) следует, что в однородной среде

$$\rho = E_\theta 2\pi r^3 / I l \sin \theta \quad \text{и} \quad \rho = E_r \pi r^3 / I l \cos \theta.$$

Подставив в эти уравнения значения напряженности поля в неоднородной горизонтально-слоистой среде, мы получим выражения для определения кажущегося сопротивления, измеряемого дипольными установками:

$$\rho_{\theta\theta} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n r^3}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right\}, \quad (IV.26)$$

$$\rho_{kr} = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n r^3 [r^2 - 2(nh_1)^2]}{[r^2 + (2nh_1)^2]^{5/2}} \right\}. \quad (IV.27)$$

Выполняя те же операции в случае трехслойного разреза, получим уравнения трехслойных кривых азимутального и радиального зондирования, которые будут аналогичны выражениям (IV.26) и (IV.27), но вместо коэффициента k_{12} под знаком суммирования будут стоять эмиссионные коэффициенты q_n .

Формула радиального (а тем самым — и осевого) зондирования отличается от формулы симметричного ВЭЗ (IV.3) наличием под знаком суммы множителя $[r^2 - 2(nh_1)^2]/[r^2 + (2nh_1)^2]$.

При изменении r от нуля до ∞ этот множитель изменяется от $-0,5$ до $+1$, т. е. всегда по абсолютной величине меньше 1. Величина множителя зависит и от числа n : при малых значениях n мно-

житель с ростом r быстро достигает своего предела; при больших значениях n дробь возрастает медленнее. Вследствие этого кривые радиального (и осевого) зондирования отличаются от кривых симметричных и азимутальных зондирований. В левой части кривых

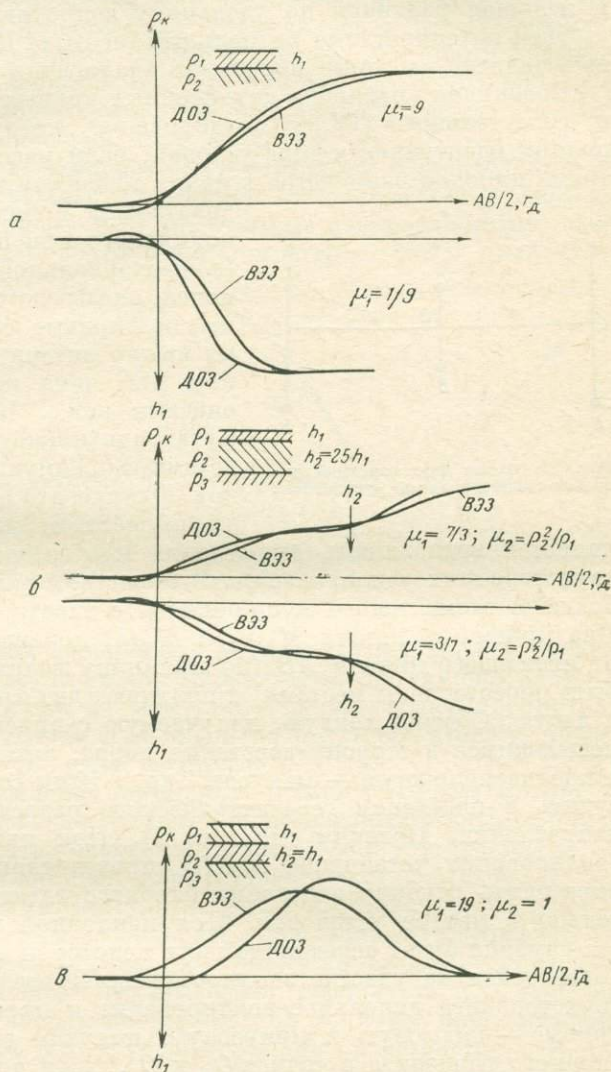


Рис. 52. Кривые дипольно-осевых и симметричных зондирований. а — двухслойные; б — трехслойные типов А и Q; в — трехслойные типа К.

появляется небольшой экстремум (максимум при $\mu_1 < 1$ и минимум при $\mu_1 > 1$); начало подъема (спуска) правой ветви смещается вправо, и сама ветвь при этом приобретает больший наклон; у трехслойных кривых средняя часть, характеризующая влияние второго слоя, проявляется более резко (рис. 52, а — в). Таким образом,

радиальные (осевые) ДЗ обладают большей разрешающей способностью, чем симметричные ВЭЗ, так как более четко отражают отдельные геоэлектрические горизонты и позволяют поэтому отделять их от выше и ниже залегающих пластов при меньшей мощности и меньшем различии по удельному сопротивлению.

Для интерпретации радиальных (осевых) ДЗ рассчитаны отдельные палетки, которые построены аналогично палеткам ВЭЗ.

Сравнивая уравнения двухслойных кривых симметричного (IV.3) и азимутального (IV.26) зондирования, нетрудно убедиться в их полной идентичности при условии, если расстояние r между центрами диполей измеряется в долях мощности первого слоя h_1 . Следовательно, кривые зондирования, выполняемого при помощи азимутальной (и экваториальной параллельной) установки, оказываются совершенно такими же, как кривые симметричных ВЭЗ, и их можно интерпретировать по палеткам ВЭЗ теми же приемами, которые описаны ниже. Казалось бы, что азимутальная (и экваториальная) установки не имеют преимуществ перед симметричной. Однако это не так. Существенным преимуществом дипольных установок

является возможность выполнения многосторонних и чаще всего двухсторонних зондирований. В качестве примера на рис. 53 изображена схема такого зондирования с экваториальной установкой. Два приемных диполя M_1N_1 и M_2N_2 перемещают в обе стороны от питающего диполя AB (по принципу взаимности диполи могут быть переставлены местами) и получают две кривые ДЭЗ — правую и левую. Обычно кривую, получаемую с приемным диполем, перемещающимся в сторону восстания пород, называют плюсовой (ρ_k^+), а противоположную — минусовой (ρ_k^-). Этим создается возможность судить о поведении геоэлектрического разреза в горизонтальном направлении. Поясним это рис. 54. При помощи вертикального зондирования установкой $AMNB$, проведенного в точке O , можно определить глубину залегания опорного электрического горизонта только в центре установки. При наклонной поверхности раздела эта глубина будет осредненной для некоторой части разреза, располагающейся на участке зондирования. Проведя в той же точке O двухстороннее дипольное зондирование и проинтерпретировав обе кривые — плюсовую и минусовую, получим значение глубины до опорного горизонта в точках O_1 и O_2 . Если построим осредненную кривую для обеих установок, то, проинтерпретировав ее, определим глубину в точке O . Таким образом, одно двухстороннее дипольное зондирование дает возможность определить глубину залегания исследуемой поверхности раздела в трех точках и по полученным значениям h , h_1 и h_2 судить об изменении разреза в горизонтальном направлении, проявляющемся в данном случае в виде воздымания

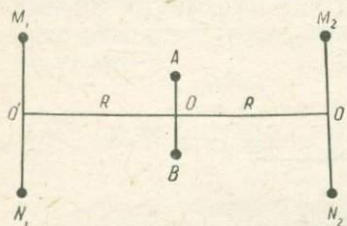


Рис. 53. Схема двухсторонней дипольно-экваториальной установки.

является возможность выполнения многосторонних и чаще всего двухсторонних зондирований. В качестве примера на рис. 53 изображена схема такого зондирования с экваториальной установкой. Два приемных диполя M_1N_1 и M_2N_2 перемещают в обе стороны от питающего диполя AB (по принципу взаимности диполи могут быть переставлены местами) и получают две кривые ДЭЗ — правую и левую. Обычно кривую, получаемую с приемным диполем, перемещающимся в сторону восстания пород, называют плюсовой (ρ_k^+), а противоположную — минусовой (ρ_k^-). Этим создается возможность судить о поведении геоэлектрического разреза в горизонтальном направлении. Поясним это рис. 54. При помощи вертикального зондирования установкой $AMNB$, проведенного в точке O , можно определить глубину залегания опорного электрического горизонта только в центре установки. При наклонной поверхности раздела эта глубина будет осредненной для некоторой части разреза, располагающейся на участке зондирования. Проведя в той же точке O двухстороннее дипольное зондирование и проинтерпретировав обе кривые — плюсовую и минусовую, получим значение глубины до опорного горизонта в точках O_1 и O_2 . Если построим осредненную кривую для обеих установок, то, проинтерпретировав ее, определим глубину в точке O . Таким образом, одно двухстороннее дипольное зондирование дает возможность определить глубину залегания исследуемой поверхности раздела в трех точках и по полученным значениям h , h_1 и h_2 судить об изменении разреза в горизонтальном направлении, проявляющемся в данном случае в виде воздымания

пластов слева направо. Сравнивая обе кривые одного двухстороннего дипольного зондирования, можно выявить наличие и других изменений в разрезе, в частности фаціальных.

Принцип эквивалентности. При истолковании результатов электроразведочных наблюдений, как указывалось в гл. II, возможна неоднозначность в решении обратной задачи. Эта неоднозначность в общем случае объясняется тем, что при известных условиях электрические поля, наблюдаемые над различными разрезами, могут практически не отличаться друг от друга.

В электроразведке методом ВЭЗ указанное обстоятельство выражается так называемым принципом эквивалентности. Согласно этому принципу кривые ВЭЗ, полученные над различными разрезами, при некотором соотношении их параметров практически



Рис. 54. Двухстороннее дипольное зондирование над наклонной поверхностью раздела.

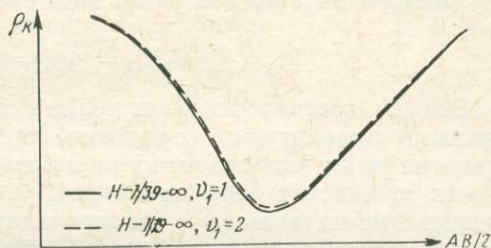


Рис. 55. Эквивалентные кривые типа Н.

(в пределах точности измерений) не отличаются одна от другой. На рис. 55 в качестве примера изображены две кривые типа Н с различными модулями μ_1 и ν_1 , но с одинаковыми параметрами первого и третьего слоев. Как видно из рисунка, кривые практически не отличаются одна от другой.

Физическое объяснение принципа эквивалентности можно получить, рассматривая электрическое поле в горизонтально-слоистой среде. При переходе из одного пласта в другой ток стремится течь в последнем пласте либо вдоль напластования (когда $\rho_i < \rho_{i-1}$), либо поперек напластования (когда $\rho_i > \rho_{i-1}$). Следовательно, в первом случае на распространение тока основное влияние оказывает продольная проводимость пласта $S_i = h_i/\rho_i$, во втором — поперечное сопротивление $T_i = h_i\rho_i$. Это позволяет утверждать, что некоторое пропорциональное изменение параметров h_i и ρ_i промежуточных пластов при условии, что величины S_i (для разрезов типов Н и А) или T_i (для разрезов типов К и Q) остаются неизменными, не нарушает поля у дневной поверхности и тем самым формы кривой ρ_k .

Таким образом, для трехслойных кривых типов Н и А эквивалентными являются разрезы, у которых одинаковая продольная проводимость второго (промежуточного) пласта, т. е.

$$S_2 = h_2/\rho_2 = \text{const.} \quad (\text{IV.28})$$

Для кривых типов К и Q аналогичное условие относится к переичному сопротивлению второго горизонта:

$$T_2 = h_2 \rho_2 = \text{const.} \quad (\text{IV.29})$$

Условия эквивалентности разрезов можно выразить в несколько ином виде через модули ν_1 и μ_1 :

$$S_2 = \frac{h_2}{\rho_2} = \frac{\nu_1 h_1}{\mu_1 h_1} = \frac{\nu_1}{\mu_1} S_1 = \text{const.}$$

Так как S_1 является величиной постоянной, то окончательно условие принципа эквивалентности по S_2 запишем в виде

$$S_2/S_1 = \nu_1/\mu_1 = \text{const.} \quad (\text{IV.28}')$$

Аналогично принцип эквивалентности по T_2 можно представить так:

$$T_2/T_1 = \nu_1 \mu_1 = \text{const.} \quad (\text{IV.29}')$$

Однако практически совпадение однотипных кривых ВЭЗ с различными параметрами (модулями) промежуточных пластов вследствие явления эквивалентности наблюдается главным образом при малых мощностях этих пластов. С увеличением мощности пластов кривые ВЭЗ начинают все больше отличаться одна от другой. Таким образом принцип эквивалентности кривых ВЭЗ действует в некоторых пределах.

Влияние наклонных границ. Теоретические основы метода ВЭЗ разработаны для горизонтально-слоистых сред. На практике же электроразведчик чаще встречается с наклонно залегающими границами, что связано с проявлениями складчатости или процессов размыва и эрозии. При небольших углах наклона поверхностей раздела в разрезе кривые ВЭЗ почти не отличаются от кривых, соответствующих разрезам с горизонтальными слоями. Но в тех случаях, когда углы наклона достигают 10° и более, искажения, вызванные наклоном слоев, становятся значительными. Расчетные и модельные работы показали, что увеличение угла наклона равносильно уменьшению модуля μ_1 кривой. В связи с этим, если предварительно не известны ни значение ρ_2 , ни угол наклона пластов, при интерпретации будет допущена ошибка в подборе нужных теоретических кривых, а тем самым возникнет ошибка в расшифровке результатов зондирования. Вследствие этого применение метода ВЭЗ ограничено районами и участками, в пределах которых пласты и геологические поверхности раздела залегают с углами наклона не более $5-10^\circ$.

§ 2. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Процесс полевых наблюдений при работе с симметричной установкой заключается в измерении кажущегося удельного сопротивления при последовательно увеличивающемся разnose питающих заземлений АВ.

Необходимо, чтобы экспериментальная кривая ВЭЗ на всем интервале изменений полуразноса $AB/2$ отражала изменение кажущегося удельного сопротивления с одинаковой детальностью. Для этого точки на кривой следует располагать равномерно. А это означает, что логарифмы полуразносов $\lg(A_1B_1/2)$, $\lg(A_2B_2/2)$ и т. д., откладываемые на оси абсцисс, должны отличаться на одно и то же число. Обозначим его через $\lg n$. Тогда

$$\begin{aligned} \lg(A_2B_2/2) &= \lg(A_1B_1/2) + \lg n, \\ \lg(A_3B_3/2) &= \lg(A_2B_2/2) + \lg n, \\ &\dots \dots \dots \\ \lg(A_iB_i/2) &= \lg(A_{i-1}B_{i-1}) + \lg n. \end{aligned}$$

Потенцируя написанные равенства, получаем

$$\begin{aligned} A_2B_2/2 &= nA_1B_1/2, \\ A_3B_3/2 &= nA_2B_2/2, \\ &\dots \dots \dots \\ A_iB_i/2 &= nA_{i-1}B_{i-1}/2. \end{aligned}$$

Из последних выражений следует, что условие равномерного расположения точек на кривой ВЭЗ требует, чтобы полуразносы питающих заземлений составляли геометрическую прогрессию со знаменателем n . Практически достаточно, чтобы расстояние $\lg n$ на логарифмическом бланке было около 40 мм. При модуле логарифмической сетки, равном 62,5 мм, можно написать: $62,5 \lg n = 40$ мм, откуда $\lg n = 10/62,5 = 0,16$, $n = 1,45 \approx 1,5$.

Таким образом, каждый последующий разнос питающих заземлений должен быть больше предыдущего примерно в полтора раза. На практике величину n несколько варьируют с тем, чтобы размеры полуразносов $AB/2$ представляли круглые числа. Один из возможных вариантов последовательности увеличения разносов питающих заземлений приведен в табл. 3.

При увеличении разносов питающих заземлений напряжение, подводимое от батареи, падает на все большем интервале. Поскольку отношение MN/AB становится при этом все меньше, разности потенциалов тоже уменьшаются и измерения ΔU становятся все более трудными. В связи с этим в процессе зондирования при достижении некоторого полуразноса $AB/2$ приходится увеличивать разнос измерительных заземлений, но так, чтобы отношение MN/AB не превышало $1/3$. Переход с одной измерительной линии на другую осуществляется на двух смежных разносах питающих заземлений. При построении кривой точки ее, полученные при данном разносе MN , соединяют в отдельный отрезок, вследствие чего вся кривая зондирования состоит из отдельных отрезков, частично перекрывающих друг друга (см. рис. 69).

AB/2, м	Расстояние от предыдущей метки, м	Вид метки
0	0	Одинарная
3	3	»
4,5	1,5	Двойная
6	1,5	Тройная
9	3	Одинарная
15	6	Двойная
25	10	Тройная
40	15	Одинарная
65	25	Двойная
100	35	Тройная
150	50	Одинарная
225	75	Двойная
325	100	Тройная
500	175	Одинарная
750	250	Двойная
1000	250	Тройная

Значения ρ_k , полученные на одном разное питающих заземлений, но на разных измерительных линиях, совпадают только при зондировании над однородной средой и при отсутствии погрешностей измерений. Обычно наблюдаемые расхождения в значениях ρ_k объясняются как неизбежными погрешностями замеров, так и влиянием неоднородностей разреза.

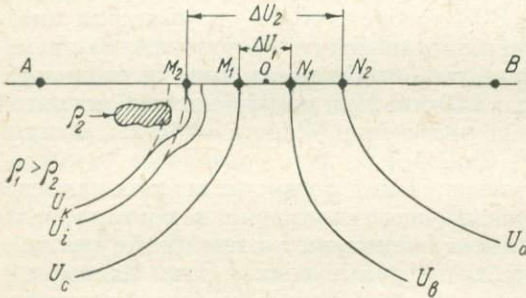


Рис. 56. Влияние локальных неоднородностей разреза на величину ΔU , измеряемую различными приемными линиями MN .

На рис. 56 изображен случай, когда вблизи измерительного заземления M_2 оказалось локальное включение породы низкого сопротивления, например небольшая линза влажных глин. Наличие такого включения вызовет смещение эквипотенциальных линий, расположенных вблизи него, относительно того положения, которое эти линии должны были бы занять в однородной среде. В частности, сместятся эквипотенциальные линии U_i и U_k , положение которых в однородной среде показано на том же рисунке пунктиром. При этом заземление M_2 приобретает потенциал $U_k > U_i$; вследствие этого разность потенциалов $\Delta U_2 = (U_k - U_a)$ между заземлениями M_2 и N_2 будет больше, чем та разность потенциалов $(U_i - U_a)$, которая должна была бы наблюдаться в однородной среде между теми же заземлениями M_2N_2 . Разность же потенциалов $\Delta U_1 = (U_c - U_b)$ между заземлениями M_1 и N_1 , более удаленными от

кого включения вызовет смещение эквипотенциальных линий, расположенных вблизи него, относительно того положения, которое эти линии должны были бы занять в однородной среде. В частности, сместятся эквипотенциальные линии U_i и U_k , положение которых в однородной среде показано на том же рисунке пунктиром. При этом заземление M_2 приобретает потенциал $U_k > U_i$; вследствие этого разность потенциалов $\Delta U_2 = (U_k - U_a)$ между заземлениями M_2 и N_2 будет больше, чем та разность потенциалов $(U_i - U_a)$, которая должна была бы наблюдаться в однородной среде между теми же заземлениями M_2N_2 . Разность же потенциалов $\Delta U_1 = (U_c - U_b)$ между заземлениями M_1 и N_1 , более удаленными от

хорошо проводящего включения, изменится значительно меньше или не изменится совсем. Таким образом, в данном случае значение ρ_k , измеренное посредством установки AM_2N_2B , будет больше величины ρ_k , измеренной установкой AM_1N_1B . Расхождения будут наблюдаться и при отсутствии локальных включений за счет влияния горизонтальных границ раздела.

Поскольку в процессе зондирования разности все время изменяются, то каждый раз соответственно изменяется и коэффициент K . Коэффициент K вычисляют по формулам, приведенным в гл. III. Расстояния для установления требуемых разностей заземлений измеряют посредством самих же проводов, предварительно размеченных соответственным образом.

Провода питающей линии подготавливают отрезками длиной до 500—1000 м (в зависимости от вместимости катушки и марки провода), и каждый отрезок наматывают на отдельную катушку. Внутренний конец провода подключают к гнездам панели, имеющейся на одной из щек катушки.

Две катушки располагают на точке зондирования, и провода с них разматывают в обе стороны постепенно по мере увеличения разности питающих заземлений. Таким образом, при помощи двух катушек можно выполнить зондирование с максимальным разностью AB (до 1—2 км). При необходимости дальнейшего увеличения разностей AB у концов размотанных с центральных катушек проводов устанавливают еще по одной катушке. Разматывая провода с этих катушек и подключая их к уже разложенному проводу, выполняют замеры на разностях AB до 2—4 км. Для дальнейшего увеличения разности устанавливают третью пару катушек и т. д.

Зондирования с разностями AB до 2 км обычно выполняют с электронными компенсаторами ЭСК или измерителями кажущегося сопротивления ИКС. При больших разностях применяют электро-разведочные станции.

Процесс полевых работ методом ВЭЗ состоит из следующих операций: а) монтаж установки; б) подготовка участка съемки; в) подготовка установки к работе на точке, или так называемое оборудование центра; г) зондирование. Поскольку предельный разность питающих заземлений определяет технику работ методом ВЭЗ, сначала рассмотрим методику зондирований с разностями до 2 км.

Малое зондирование (AB до 2 км). Схема установки для выполнения такого зондирования с применением ЭСК показана на рис. 57.

Монтаж установки. Монтаж установки заключается в подготовке и разметке проводов питающей и измерительных линий, изготовлении заземлений и соединительных проводников.

Провода для питающей линии разматывают на ровном участке местности и отрезают два равных куска OA и OB . Длина каждого из них на 5—6 м должна превышать величину предельного разности $AB/2$. На обоих кусках, отступая от начала провода на 1,5—

2 м, ставят начальную метку, от которой отмеряют затем величины всех полуразносов $AB/2$. Конечная метка будет соответствовать предельному полуразносу $AB/2$. Чтобы различать метки, их делают одинарными, двойными и тройными и последовательно чередуют. Соответствующие расстояния должны приходиться против середины меток.

В табл. 3 приведена примерная схема разметки питающей линии для зондирования.

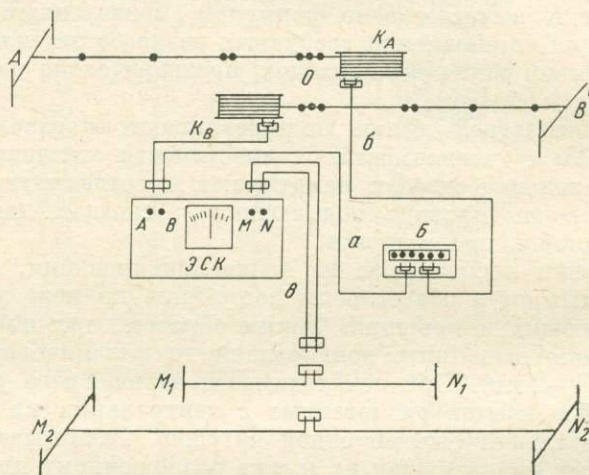


Рис. 57. Схема установки для вертикального электрического зондирования с ЭСК.

K_A, K_B — катушки с проводами питающей линии; B — батарея; ЭСК — электронный компенсатор; $a-b$ — соединительные проводники для подключения измерительного прибора и батареи.

Со стороны конечных меток провода зачищают и подключают к панелям катушек; на внешние концы проводов надевают полевые вилки со штырями, после чего их наматывают на катушки. При смотке просматривают изоляцию и поврежденные участки ремонтируют. Для проверки целостности металлической жилы провода «прозванивают» (см. § 4 гл. III).

Подготовка и разметка проводов измерительных линий производятся аналогичным образом. Каждая измерительная линия изготовляется из двух отрезков проводов, длина которых на несколько метров превышает величину соответствующего полуразноса $MN/2$. Величину полуразноса отмечают двумя метками — начальной и конечной. С обеих сторон оставляют свободные концы. Парные отрезки связывают между собой так, чтобы узел оказался около начальных меток, и на внутренние концы (оказавшиеся около узла) надевают полевую вилку с гнездами (каждый провод присоединяют к отдельному гнезду). Внешние концы на 15–20 см зачищают от изоляции для присоединения к электродам.

Питающие заземления собирают из железных электродов, соединяя их в связки по три-пять штук. На первых разносох достаточно забивать по одному (два) электроду на каждом заземлении. С увеличением разносов число электродов увеличивают. Иногда в условиях высокого сопротивления верхнего горизонта разреза число электродов в одном заземлении доходит до 10—20.

Для приемных заземлений применяют медные электроды. На малых разносох *MN* обычно достаточно одного-двух электродов на каждом заземлении.

Соединительные проводники изготавливают из мягких проводов (без стальных жил) применительно к схеме, приведенной на рис. 57. Комплект таких проводников для установки с ЭСК состоит из тройного соединения (тройника) *a* и проводников *b* и *в*. Кроме того, подготавливают короткие проводники («перекидки») для последовательного соединения батарей между собой и закороченные вилки для переключения напряжения батарей. При работе с телефонной сигнализацией подготавливают еще два проводника для подключения телефонного аппарата. Проводники *a*, *b*, *в* должны иметь длину 1,5—2,5 м, «перекидки» — 0,3—0,5 м. Все соединительные проводники заканчиваются вилками со штырями.

Подготовка участка съемки. Сеть наблюдений для выполнения вертикальных электрических зондирований зависит от геологической задачи и масштаба съемки. При рекогносцировочных работах точки ВЭЗ обычно располагают по отдельным маршрутам, часто приурочиваемым к дорогам. При более детальных работах, сопутствующих геологическим съемкам, поискам и разведке структур и инженерно-геологическим изысканиям, разбивают геометрическую сеть профилей, на которых располагают точки зондирования. При разбивке сети учитывают рельеф и другие конкретные условия местности (залесенность, заболоченность, расположение сельскохозяйственных угодий, дороги), которые могут оказать влияние на проведение работ. Все точки ВЭЗ закрепляют на местности деревянными столбиками и привязывают к опорным геодезическим пунктам с целью определения координат и высотных отметок. На каждом столбике пишут номера профиля и пикета, номер ВЭЗ, год проведения работ.

Профили и маршруты располагают вкрест простирания предполагаемой или разведваемой структуры. Провода питающих и приемных линий можно разматывать как вдоль профиля, так и в поперечном направлении, принимая во внимание прежде всего геологические условия. Желательно, чтобы установка не пересекала участки с резко неоднородными толщами, залегающими на небольшой глубине, а геологический разрез в пределах максимального интервала разносов питающих заземлений выдерживался бы в горизонтальном направлении. Кроме того, следует учитывать рельеф дневной поверхности и условия передвижения транспорта.

Подготовка установки и выполнение зондирования. К точке зондирования, которая будет являться центром измерительной установки, подвозится все оборудование. По буссоли провешивается

и фиксируется либо вешками, установленными на расстоянии 100—150 м по обе стороны от центра, либо местными ориентирами направленные для разносов питающей и измерительных линий.

Установку для зондирования собирают в соответствии со схемой, изображенной на рис. 57. Сначала разматывают измерительные линии. Чтобы выдержать размеры этих линий, узел с начальными метками располагают около центрального кола, которым отмечают центр измерительной установки, а электроды забивают у концевых меток. На больших измерительных линиях, где каждое заземление состоит из нескольких электродов, соединенных параллельно, электроды забивают в землю по линии, перпендикулярной к направлению разносов на расстоянии один от другого не менее 3—4-кратной длины их. Измерительные заземления M_1, N_1, M_2, N_2 и другие располагают в одну линию по направлению разметки питающей линии. Для уменьшения влияния индуктивных наводок провода больших измерительных линий ($MN > 100$ м) относят в сторону от проводов питающей линии на 8—10 м.

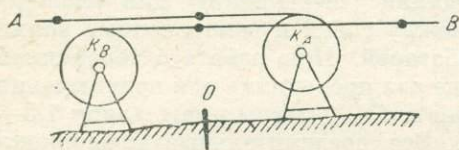


Рис. 58. Размотка питающей линии по меткам.

После окончания разматки измерительных линий приступают к подготовке питающей линии. Катушки K_A и K_B устанавливают на стойках по обе стороны от центра, как показано на рис. 58, и подготавливают первый разнос ($AB/2 = 3$ м). Для этого разматывают провода с катушек в обе стороны от центра до тех пор, пока вторая одиночная метка, соответствующая первому разносу, на обоих проводах не окажется над колом. После этого обе метки прижимают к колу, натягивают провода и забивают заземления A и B у начальных меток, находящихся на концах проводов, и последние подключают к заземлениям. На малых разносах на каждом заземлении забивают по одному электроду, а остальные, имеющиеся в связке, кладут на землю вплотную к забитому. При увеличении разносов забивают два, потом три электрода и больше.

Прибор устанавливают на штативе около центра зондирования; справа от него, панелями к оператору, на резиновом ковре укладывают батареи и включают их и прибор в измерительную установку. На малых разносах используют одну батарею; дополнительные батареи подключают в процессе зондирования по мере уменьшения измеряемых разностей потенциалов.

При выполнении замеров на каждом разносе нужно соблюдать следующие правила.

1. Величину ΔU на разносе с целью уменьшения влияния неостоянства напряжения батарей определять до измерения силы тока.

2. Во избежание нарушения контакта электродов с землей и в соответствии с требованиями техники безопасности рабочие на

заземлениях A и B во время измерения должны находиться на расстоянии не менее 3—4 м от электродов.

3. Переход на следующий разнос $AB/2$ можно проводить лишь после того, как вычислитель нанесет полученное значение ρ_k на билогарифмическую сетку и убедится, что полученная точка не нарушает плавного хода кривой. Запись наблюдений ведут в полевом журнале. На правой стороне журнала в соответствующих графах записывают величины разносов и коэффициента установки K , измеренные значения ΔU и I и вычисленное значение ρ_k . На левой стороне журнала нанесена билогарифмическая сетка, на которой сразу же в поле в процессе наблюдений вычерчивают кривую ВЭЗ. В журнал заносят также местоположение точки, азимут разносов, дату, время начала и окончания работы на данной точке, состояние погоды, фамилии оператора и вычислителя.

После окончания измерений на очередном разноре рабочий на центре по команде оператора «вперед» отключает от катушек K_A и K_B вилки тройника и соединительного проводника, рабочие на заземлениях A и B извлекают из земли электроды и тянут провода в намеченных направлениях. Рабочий на центре следит за метками и прекращает размотку провода, как только появится очередная метка. Затем он прижимает метки к колу, рабочие на заземлениях натягивают провода и, забив электроды у начальных меток, сигнализируют о готовности питающей линии; рабочий на центре подключает измерительный прибор и батареи к катушкам, и оператор приступает к измерениям на новом разноре. Для уменьшения возможных влияний утечек провода линий AB и MN следует располагать не ближе 1—5 м (при $AB < 1$ км) и 8—10 м (при $AB > 1$ км). Питающие провода не должны касаться приемных заземлений.

По мере того как с увеличением разносов $AB/2$ измеряемые разности потенциалов уменьшаются, оператор повышает напряжение питающей батареи или дает указание рабочим на заземлениях увеличить число забиваемых на заземлениях электродов. При этом сила тока не должна быть более 50 сА на одну батарею марки 69-ГРМЦ-6 и не более 100 сА на батарею 29-ГРМЦ-13 (при последовательном соединении их секций). Чтобы обеспечивалась требуемая инструкцией точность измерения ρ_k , измеряемые значения ΔU при работе с ЭСК должны быть не менее 0,3 мВ, при работе с ИКС — не менее 5 мкВ. Увеличивать измеряемые разности потенциалов только путем повышения напряжения питающих батарей нельзя, так как это нарушает требования техники безопасности и увеличивает возможность утечек, особенно при работе в сырую погоду (или на влажной местности) и при плохих проводах. Также нерационально чрезмерно увеличивать число электродов на заземлениях питающей линии, так как это сильно замедляет работу. Оператор должен умело варьировать обоими способами увеличения измеряемой разности потенциалов.

После окончания зондирования провода сматывают, установку разбирают и все оборудование перевозят на следующую точку. При зондировании выполняют следующие проверки прибора и установки.

1. Перед началом работы и в конце рабочего дня проверяют напряжение источников питания ЭСК и ИКС.

2. На всех полуразносах $AB/2$ более 500 м, а также в точках, характеризующихся на графике резким изменением хода кривой зондирования, контролируют погрешности, вызываемые утечками тока из питающей линии. Контроль проводится одним из способов, описанных в гл. III. Расхождение между основным и повторным значениями ρ_k не должно превышать $\pm 5\%$ от среднего арифметического обоих измерений. По двум значениям ρ_k вычисляют среднее арифметическое, по которому и строят кривую ВЭЗ. Наличие больших расхождений свидетельствует (при отсутствии случайных погрешностей измерения по вине оператора) об утечках тока в питающей линии.

При обнаружении утечек провода питающей линии тщательно просматривают и поврежденное место изолируют.

3. В сырую погоду измеряют сопротивление изоляции приборов, производят проверку на утечку через их корпус, а также на утечку в измерительных линиях.

При выполнении зондирования указания рабочим, разматывающим провода питающей линии и перемещающим заземления A и B , на небольших разносах передают голосом, флажками или звуковыми сигналами. При этом разрабатывают сигнальный код, в котором обязательно должны быть предусмотрены сигналы со стороны рабочих о выполнении очередного указания или о повторении сигнала при плохой видимости или слышимости. Сигналы с центра подаются оператором или по его указанию рабочим.

При разносах более 500 м раньше применялась телефонная связь, для которой полевые телефоны включались в питающую линию по однопроводной схеме (вторым проводом служит земля). В настоящее время для сигнализации лучше использовать портативные радиостанции типа «Недра».

При работе вблизи линий электрифицированных железных дорог, трамваев, около шахт и рудников с электровозной откаткой наблюдаются блуждающие токи, обусловленные утечками из рельсов и других заземленных точек электрических установок. Блуждающие токи создают в измерительной цепи переменные разности потенциалов, вызывающие нерегулярные колебания стрелки гальванометра.

Для преодоления этой помехи зондирования следует выполнять в часы уменьшения интенсивности блуждающих токов (в ночное время, в периоды уменьшения движения поездов), провода измерения с ИКС, как с прибором, хорошо защищенным от помех.

Большое зондирование ($AB > 2$ км). Особенностью методики зондирований с разносами, превышающими 2 км, является применение электроразведочной станции и двух питающих линий. Схема установки для большого зондирования показана на рис. 59.

Одна питающая линия, называемая малой и обозначаемая $A'B'$, служит для выполнения замеров с разносами до 1—2 км; при этом измерения проводятся с ЭСК или ИКС с использованием батарейного

питания от генераторной группы станции. Другая (большая) питающая линия AB служит для замеров на разнотах свыше 2 км. Измерения на малой линии проводят в то время, пока готовят к измерениям большую линию или в промежутках между замерами на ней, так как переходы с разнота на разнот занимают на большой линии значительно больше времени, чем на малой.

Для увязки двух частей кривой большого зондирования, выполненного порознь на малой и большой питающих линиях, используют один-два общих для этих линий разнот, на которых измерения осуществляют как с ЭСК (или ИКС), так и со станцией.

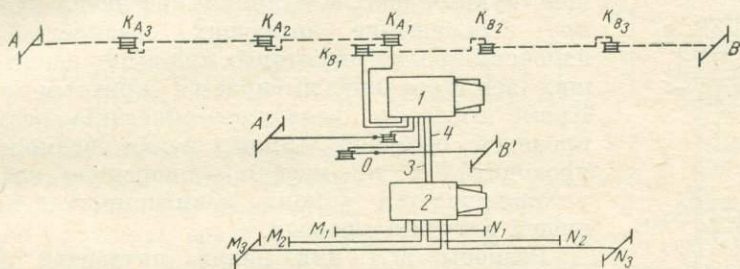


Рис. 59. Схема установки для зондирования с большими разнотами.

1 — генераторная группа; 2 — полевая лаборатория; контакторы: 3 — для управления контакторами, 4 — для связи; $K_{A1} - K_{A3}$, $K_{B1} - K_{B3}$ — катушки большой питающей линии.

При измерении разностей потенциалов на больших разнотах оператор встречается с помехами различного характера. Это и обусловило необходимость применения электроразведочных станций с осциллографической регистрацией и отразилось в методике выполнения зондирования.

Одна из этих помех связана с явлением индукции в моменты замыкания и размыкания тока в питающей линии; вследствие этого в измерительной линии появляется дополнительная (и меняющаяся во времени) разность потенциалов, искажающая искомую ΔU . Для уменьшения индуктивного влияния питающей линии на приемную их удаляют друг от друга на расстояние не менее чем $AB/100$; осциллографирование же позволяет полностью исключить индуктивную помеху.

Другим источником помех являются теллурические токи, которые вызывают нерегулярные колебания гальванометра. Для уменьшения их влияния рекомендуется измерения с большими разнотами MN в средних широтах (до 55° с. ш.) проводить в ночное время, когда интенсивность этих полей уменьшается. Линии разнот по возможности следует располагать в широтном направлении. В северных районах замеры целесообразно проводить днем, располагая линию в направлении, близком к меридиану. Наиболее радикальным средством преодоления теллурических помех является переход на осциллографическую запись.

Монтаж установки. Малую линию $A'B'$ подготавливают так же, как и для малого зондирования. Большая линия монтируется из отрезков A_1A_2 , B_1B_2 , A_2A_3 , B_2B_3 и т. д. по 500 м каждый. Но при монтаже линии провода нарезают кусками длиной 505—506 м и ставят на них по две метки — начальную и конечную, отступая от концов проводов на 2—3 м. Со стороны конечных меток провода зачищают и подключают их к панелям полевых катушек; на внешние концы проводов одевают вилки. При намотке проводов на катушки проверяют их изоляцию, а затем «прозванивают». Такая конструкция большой линии обеспечивает удобное перемещение питающих заземлений, шаг изменения разносов которых при выполнении больших зондирований выбирается кратным 500 м. Кроме того, это позволяет облегчить размотку проводов большой линии, давая возможность проводить ее по частям — очередная катушка устанавливается у конца размотанного с предыдущей катушки провода.

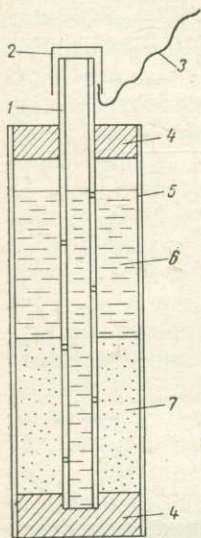


Рис. 60. Неполаризующийся электрод.

- 1 — медная трубка с отверстиями; 2 — медный колпачок; 3 — провод измерительной линии; 4 — резиновые пробки; 5 — брезентовый шланг; 6 — раствор медного купороса; 7 — медный купорос.

Разносы MN для малой питающей линии монтируются так же, как и для малых ВЭЗ. Для большой линии разносы MN достигают 250—1000 м. В связи с этим провода таких измерительных линий наматывают на отдельные катушки, а для заземлений M и N применяют электроды особой конструкции — так называемые неполаризующиеся электроды. Они представляют собой цилиндрические брезентовые мешочки высотой 35—40 см и диаметром 4—6 см с медной трубкой (сердечником) внутри (рис. 60). Мешочки набивают увлажненным химически чистым медным купоросом и при работе устанавливают в цилиндрические ямки в почве. Провода приемной линии подключают к сердечникам электродов; контакт с почвой осуществляется через медленно просачивающийся сквозь брезент раствор купороса.

Назначение таких электродов — уменьшить величину суммарной поляризации обоих заземлений и сохранить ее во времени возможно более постоянной (изменение поляризации таких электродов допускается не более чем на 10 мкВ в минуту). Подробно принцип действия неполаризующихся электродов рассматривается в гл. VII.

Подготовка участка съемки. Участок для проведения больших зондирований подготавливается в целом с соблюдением тех же правил, что и для малых зондирований. Однако вследствие использования в работе электроразведочных станций сеть пунктов ВЭЗ тщательно привязывают к дорогам, чтобы, с одной стороны, облегчить подъезды автомашин к центрам зондирований и, с другой — по возможности избежать потравы посевов и посадок.

710

Подготовка установки и выполнение зондирования. Электроразведочную станцию и измерительную установку малой линии располагают на центре в соответствии с рис. 59. (Здесь и ниже описание ведется применительно к основному виду электроразведочных станций с отдельными генераторной группой и полевой лабораторией типа ЭРСУ-60.)

Малая установка подготавливается к работе так же, как при выполнении малых зондирований. По окончании подготовки этой установки оператор, не ожидая завершения подготовки большой установки, приступает к измерениям на малой линии в порядке, описанном выше (см. **Малое зондирование**).

При подготовке большой установки линии *AB* и *MN* подключаются соответственно к выходной панели генераторной группы и входной панели измерительной лаборатории (см. рис. 34), которые соединяются между собой пятижильным кондуктором для связи и управления контакторами и заземляются (причем сопротивление заземления должно быть не более 5 Ом).

Затем операторы генераторной группы ГГ и измерительной лаборатории ИЛ проверяют аппаратуру (надежность управления контакторами из измерительной лаборатории, работу генераторов, переговорного устройства и линии связи с рабочими на питающих заземлениях, работу осциллографа и др.). Станция проверяется также на утечку при помощи мегометра. Сопротивление изоляции регистрирующих каналов относительно корпуса осциллографа должно быть не менее 5 МОм.

Большое внимание уделяется работе на питающих заземлениях. Число электродов на одном заземлении должно быть таким, чтобы на каждый из них приходилось не более 0,5 А питающего тока. Телефоны для прослушивания во время замеров включаются параллельно питающему заземлению, а после получения сигнала о передаче распоряжений включаются непосредственно между концом линии и питающим заземлением. Рабочие, обслуживающие питающую линию, должны иметь резиновые сапоги и перчатки.

Проверив по телефону подготовленность питающих заземлений, оператор ИЛ дает указание оператору ГГ о типе питания (батарейное, генераторное) и режиме работы (удвоения или однополярных импульсов). При работе в режиме однополярных импульсов источник тока попеременно то включается, то выключается с сохранением полярности подключения питающей линии (рис. 61, *а*). В режиме удвоения источник питания остается включенным на весь период работы, но периодически меняется полярность его подключения в питающую линию (рис. 61, *б*). Режим удвоения удобен тем, что

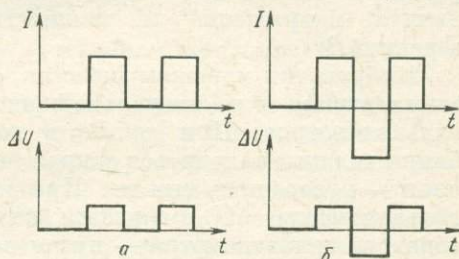


Рис. 61. Графики тока в питающей линии и разности потенциалов в измерительной линии при работе ЭРС в режиме однополярных импульсов (*а*) и удвоения (*б*).

позволяет обходиться без выключения источника (что существенно при использовании машинных генераторов); при малых величинах наблюдаемых разностей потенциалов он облегчает их регистрацию и измерение за счет удвоения амплитуды отклонения гальванометра.

При работе с батарейным питанием могут применяться оба режима работы (но целесообразнее — режим удвоения), при работе с питанием от генераторов — только режим удвоения.

Обычно на первых разностях большой линии работают с батареями, а на генераторное питание переходят, когда измеряемые разности потенциалов становятся очень малыми и необходимо увеличить напряжение и мощность источника питающего тока в цепи AB .

Выбрав тип и режим питания, оператор ИЛ включает освещение осциллографа и по визуальной шкале проверяет положение бликов гальванометров. При работе в режиме однополярных импульсов блики должны находиться у края шкалы, при работе в режиме удвоения — в середине шкалы. При необходимости регулировок блик гальванометра ΔU смещается компенсатором поляризации, блик токового гальванометра — путем закручивания нити подвески. Затем в питающую линию подаются пробные импульсы тока от выбранного источника питания. Для этого генераторы должны быть запущены, а ток от батарей включен посредством тумблера на управляющей панели измерительной лаборатории. Для пуска генераторов оператор ГГ по команде оператора ИЛ подает сигнал водителю о запуске двигателя автомашины. После того как двигатель набрал обороты, водитель плавно отпускает сцепление, а оператор ГГ посредством реостатов возбуждения устанавливает нужное напряжение генераторов.

Оператор ИЛ пробные импульсы использует для выбора оптимальных условий регистрации ΔU . Отклонение блика гальванометра ΔU должно быть не менее 10 мм (чтобы величина ΔU определялась по осциллограмме с точностью до 3%), а блика токового гальванометра — не менее 25 мм.

Регулирование отклонений бликов может достигаться изменением: а) силы посылаемого в землю тока; б) чувствительности регистрирующего канала ΔU осциллографа.

Оператор должен уметь сочетать эти способы, так как увеличение чувствительности канала ΔU приводит к одновременному увеличению искажений за счет помех, а увеличение напряжения и силы питающего тока повышает опасность возникновения утечек.

Оператор ИЛ подбирает также градуировочный импульс ΔU , который должен быть таким, чтобы отклонение блика гальванометра было соразмерно отклонению его от рабочих импульсов ΔU . Во время пробных импульсов оператор ГГ устанавливает оптимальный режим записи силы тока на осциллографе ГГ. Из шести имеющихся на пульте эталонных сопротивлений включают то, которое обеспечивает наибольшее отклонение блика гальванометра, но не выходящее за пределы визуальной шкалы осциллографа.

Подобрав оптимальные условия регистрации, оператор ИЛ запускает лентопротяжный механизм осциллографа и производит рабочую запись. Скорость протяжки осциллографной бумаги должна быть такой, чтобы записываемые импульсы имели на ленте ширину 2—6 см. Длительность импульсов должна составлять не менее 5—6 с, а при заметном влиянии явления становления поля — превышать время становления t_c по меньшей мере в 2 раза. Средняя величина t_c определяется на основании пробных наблюдений в данном районе, а ориентировочно может быть подсчитана по формуле

$$t_c = 1,98SAB \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad (\text{IV.30})$$

где AB — разнос установки; S — суммарная продольная проводимость разреза.

На каждом разноре AB регистрируют несколько рабочих импульсов, число которых зависит от характера и уровня помех. Для этого оператор ИЛ следит во время регистрации за поведением бликов по визуальной шкале, контролируя тем самым условия записи. При отсутствии помех и надежной работе аппаратуры оператор ограничивается двумя-тремя импульсами; при наличии помех число их увеличивают до пяти и больше с тем, чтобы не менее двух-трех импульсов было приурочено к моментам более спокойного поля.

При работе по схеме удвоения импульсы разного знака подаются последовательно один за другим без перерыва; при работе в режиме однополярных импульсов (на батарейном питании) между рабочими импульсами соблюдают перерывы (без остановки лентопротяжного механизма) длительностью 5—6 с. В конце записи оператор ИЛ посылает несколько коротких импульсов, предупреждая этим телефонистов на питающих заземлениях об окончании измерений на данном разноре.

По окончании записи рабочих импульсов оператор выключает питающий ток из линии AB и, не останавливая лентопротяжного механизма, записывает градуировочные импульсы ΔU , также контролируя условия их регистрации, и градуировочные импульсы канала токового гальванометра I .

При значительных вариациях теллурического поля в начале записи и после регистрации рабочих и градуировочных импульсов в течение 1—2 мин регистрируют нулевую линию, что дает возможность получить представление о характере поведения теллурического поля в период записи.

Закончив регистрацию, оператор ИЛ останавливает лентопротяжный механизм, выключает освещение осциллографа и сообщает оператору ГГ об окончании замера. Получив это сообщение, оператор ГГ выключает питание контакторов, а водитель останавливает двигатель автомашины.

Оператор ИЛ извлекает кассету из осциллографа и передает ее помощнику оператора для проявления осциллограммы. Еще до окончания обработки осциллограммы в фиксаже оператор ИЛ проверяет ее качество и, убедившись в хорошей записи рабочих и градуировочных

импульсов, в отсутствии резких искажений из-за помех, с помощью оператора ГГ подключает переговорное устройство к линии AB и дает указание рабочим на заземлениях о переходе на следующий разнос. При наличии брака в записи, препятствующего обработке осциллограммы, регистрация на данном разнесе повторяется.

На оборотной стороне осциллограммы заполняется ее паспорт по следующей форме.

Паспорт осциллограммы

Осциллограмма
 ВЭЗ
 Дата и время измерений
 $AB/2$ $MN/2$ Шунт

Канал ($\Delta U_1, \Delta U_2, I$)	Чувствительность	Градуйровочный импульс, мВ	Примечание

Электроразведочная партия
 Управление, контора, трест
 Оператор

Осциллограммы регистрируют в специальном журнале и передают интерпретатору для обработки. Осциллограммы бракуются: а) при отсутствии данных в паспорте; б) при плохой их фотообработке; в) при отсутствии проверки на утечки; г) при колебаниях силы тока в линии AB за время одного импульса больше чем на 2%; д) при нарушении требований выбора условий регистрации рабочих и градуировочных импульсов.

В описанном порядке выполняют все зондирование.

Проверки на утечку при хорошем состоянии изоляции проводов и сухой почве на участке работ проводят при переходе с первой линии MN на вторую и на последнем разнесе AB , а в сырую погоду при влажной почве и низком качестве проводов — на каждом переходе с одной линии MN на другую.

Проверки осциллографируют и отмечают в журнале регистрации осциллограмм. Для выполнения проверки отключают поочередно питающие заземления, подают несколько импульсов напряжением не менее 200—300 В и записывают показания гальванометров.

На рис. 62 представлены типичные формы рабочих импульсов ΔU , наблюдаемых на осциллограммах. Импульсы 1, 2 отражают влияние становления поля, импульсы 3, 4 — влияние переходных процессов индуктивной природы, возникающих при включении и выключении тока в питающей линии; импульсы 5—8 наблюдаются при одновременном влиянии обеих помех. Неустойчивость поляризации прием-

ных электродов отмечается смещением трассы гальванометра ΔU (импульсы 9, 10); теллурические помехи выражаются общим усложнением характера трассы (импульсы 11, 12). На рис. 63 представлены осциллограммы с записями помех от промышленных и теллурических токов.

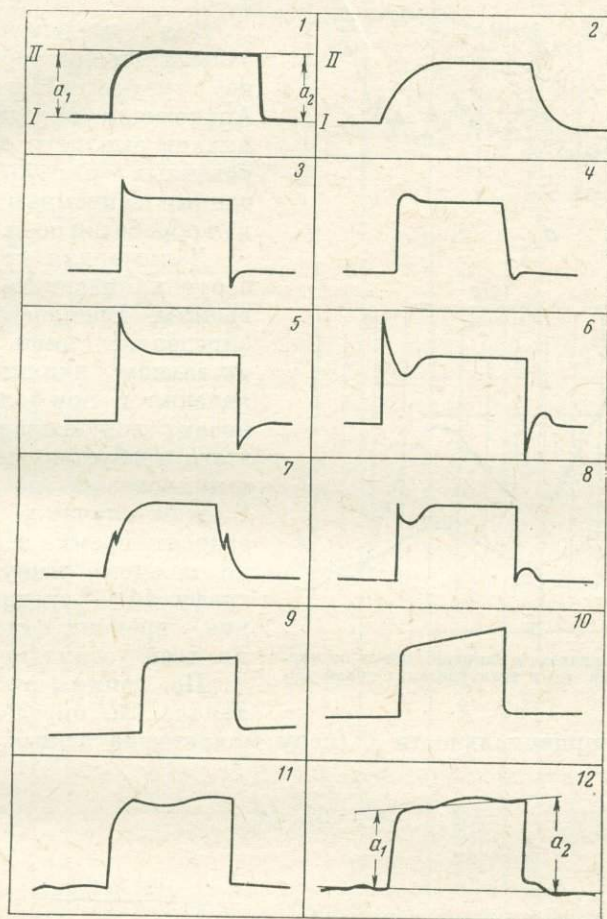


Рис. 62. Типичные формы рабочих импульсов ΔU .

Обработка осциллограмм. Осциллограммы обрабатывают одновременно с полевыми измерениями. Прежде всего отбраковывают резко искаженные импульсы ΔU . Пригодные для обработки импульсы нумеруют и на них проводят нулевые линии $I-I$ и линии установившегося значения ΔU $II-II$ (рис. 64). Линии проводят по нижним или верхним кромкам трассы. Если запись характеризуется размывом трассы вследствие высокочастотных или иных аппаратурных помех, указанные линии проводят по центру трассы

(при ширине размыва, превышающей $1/10$ амплитуды импульса, последний бракуется). Затем при помощи измерителя снимают величины амплитуды a_i установившихся отклонений блика в миллиметрах (см. рис. 62 и 64).

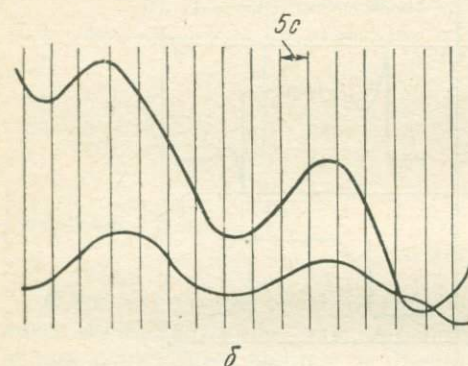
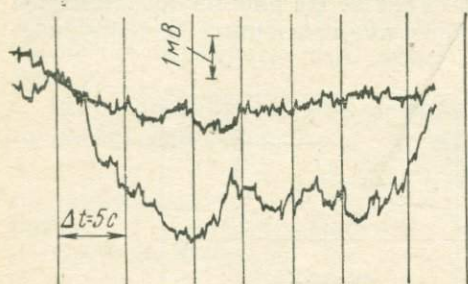


Рис. 63. Осциллограммы с записью помех от промышленных токов (а) и теллурических токов (б).

житель пропорциональности C (цену миллиметра записи в милливольтах):

$$C = \Delta U_r / a_r.$$

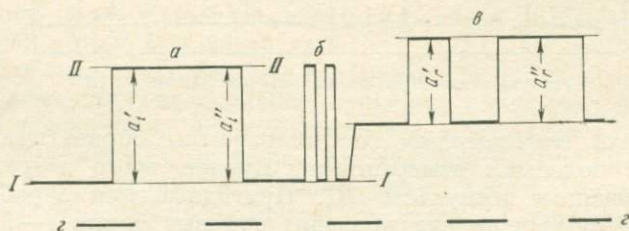


Рис. 64. Образец осциллограммы с записями рабочих и градуировочных импульсов ΔU .

a — рабочий импульс; b — сигналы окончания измерений; $г$ — градуировочные импульсы; $г$ — марки времени.

Для исключения случайных ошибок берут не менее трех-пяти значений a_i . Аналогично определяют величины амплитуд a_r градуировочных импульсов. Эти данные записывают в журнал обработки осциллограмм.

Данные для граф 1—4, 6 берут из паспорта осциллограммы. Время становления определяют лишь при значительном влиянии этого явления и при больших разностях зондирований. Для этого требуется маркировка осциллограмм по времени. В этом случае в графу 13 заносят время становления по каждому импульсу, а в графу 14 — среднее значение времени становления по всей осциллограмме.

По данным градуировки канала ΔU определяют мно-

Журнал обработки осциллограм

№ ВЭЗ	№ осциллограммы	$AB/2, \text{ м}$	$MN/2, \text{ м}$	№ им-пульса	ΔU						
					$\Delta U_{\Gamma}, \text{ мВ}$	$a_{\Gamma}, \text{ мм}$	$C, \text{ мВ/мм}$	$C_{\text{ср}}, \text{ мВ/мм}$	$a_i, \text{ мм}$	$(a_i)_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$\Delta U_i, \text{ мВ}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Продолжение

ΔU		I						К	$\rho_K, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	Примечание
$(t_c)_i, \text{ с}$	$(t_c)_{\text{ср}}, \text{ с}$	значение «шунта»	$d_3, \text{ сА/мм}$	$b_{\Gamma}^0, \text{ мм}$	$b_{\Gamma}, \text{ мм}$	p	$I_i, \text{ сА}$			
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Величину ΔU_i на данном разноте вычисляют по формуле

$$\Delta U_i = (a_i)_{\text{ср}} C_{\text{ср}},$$

где $(a_i)_{\text{ср}}$ — средняя амплитуда рабочих импульсов ΔU ; $C_{\text{ср}}$ — среднее значение множителя пропорциональности.

Силу тока I вычисляют несколько иначе.

На первых разнотах зондирования выполняют эталонировку токового канала. Для этого в цепь AB последовательно включают шунт точного амперметра. Затем осуществляют запись на осциллограмму токовых импульсов поочередно на каждом «шунте» блока калиброванных сопротивлений, находящихся в питающей цепи схемы станции. Одновременно в журнал записывают силу питающего тока по показаниям точного амперметра (в сА). После каждого токового импульса регистрируют градуировочный импульс, подаваемый в цепь токового гальванометра от специального источника осциллографа и имеющий всегда постоянную величину.

Сняв с осциллограммы амплитуды токовых эталонных импульсов b_3 , вычисляют коэффициент пропорциональности d (цену миллиметра записи в сА) для каждого шунта: $d = I/b_3$, где I — показания амперметра в сА; значениям d_3 и b_3 для каждого шунта соответствуют некоторые величины градуировочных импульсов b_r^0 .

При обработке рабочих осциллограмм в графу 15 журнала переносят из паспорта значение «шунта», на котором записывался ток; величины d_3 (графа 16) и b_r^0 (графа 17) получают из данных эталонировки.

С рабочей осциллограммы снимают при помощи измерителя значения амплитуд токовых импульсов b_i и токовых градуировочных импульсов b_r в мм (так же, как для канала ΔU). Поскольку градуировочные импульсы токового канала по величине постоянны, при сохранении постоянства параметров канала токового гальванометра его чувствительность должна быть неизменной и поэтому должно соблюдаться условие $b_r = b_r^0$.

В этом случае для вычисления силы тока по амплитуде токовых импульсов можно пользоваться величиной d_3 .

Если же по той или иной причине чувствительность токового канала изменилась, то $b_r \neq b_r^0$ и при вычислении силы тока надо ввести поправочный множитель $p = b_r^0/b_r$. Тогда $I = b_i dp$, где I в сА.

В графу 21 записывают значение коэффициента установки K и вычисляют величину ρ_K , которую переносят на билогарифмический бланк. По ходу кривой ВЭЗ оператор и интерпретатор судят о качестве измерений и при необходимости повторяют наблюдения на разнотах с резкими нарушениями формы кривой зондирования.

Конвейерная система работы. С целью повышения производительности труда за счет сокращения времени на размотку и смотку проводов большой линии при выполнении больших зондирований применяют конвейерную систему организации работ. В этом случае шаг наблюдений должен быть кратным 500 м. Тогда отпадает необ-

ходимость каждый раз полностью сматывать все провода большой линии. При переезде на следующую точку зондирования только один отрезок провода, равный шагу наблюдений, должен быть смотан с заднего по ходу профиля края большой линии и переброшен вперед. Все остальные отрезки проводов остаются на месте. Оборудование центра (малая линия, линии MN , батареи, прибор) перевозится на новый центр зондирования. Конвейерная система требует совпадения направления разносов питающих заземлений (т. е. размотки проводов) с направлением профилей.

Для ускорения размотки и смотки проводов, забивки питающих электродов и вытаскивания их из земли при выполнении больших зондирований может применяться самоходная установка ЭВ-1, смонтированная на автомобиле повышенной проходимости ГАЗ-63. На нем смонтированы два барабана, вмещающие 8 км провода ГППП, укладчик провода и задавливатель электродов. Задавливатель вдавлиывает штанги-электроды диаметром 42 мм на глубину 2, 4, 6, 8 или 10 м посредством масляного насоса, создающего в системе давление до 60 кгс/см². Этот же задавливатель извлекает электроды из земли. Установка снабжена средствами связи (телефон, радиостанция).

Для выполнения ВЭЗ нужны две установки ЭВ-1, из которых одна обслуживает разнос AO , а другая — разнос BO .

Трехточечное зондирование. Схема установки для трехточечного зондирования изображена на рис. 65. В этой установке имеется третье питающее заземление C , относимое в «бесконечность». Обычно заземление C помещают на перпендикуляре к линии AB против середины O интервала MN . Расстояние OC достаточно брать равным 10—15-кратному максимальному полуразносу заземлений AB .

В процессе зондирования заземление C оставляют неподвижным, а заземления A и B разносят в противоположные стороны от точки O ; батарея одним полюсом постоянно подключена к заземлению C ; другим полюсом она на каждом разносе поочередно подключается то к A , то к B . По результатам измерений на одной точке зондирования получают две кривые ВЭЗ — установкой AMN , $C \rightarrow \infty$ и установкой BMN , $C \rightarrow \infty$. При этом по оси абсцисс откладывают расстояние AO (или BO). Коэффициент K установки вычисляют по формуле

$$K = 2\pi \overline{AMAN} / 10 \cdot MN = 2\pi \overline{BMBN} / 10 \cdot MN,$$

которая отличается от формулы для установки $AMNB$ множителем 2.

Кривые трехточечных и четырехточечных ВЭЗ в общем случае идентичны, и поэтому для интерпретации кривых трехточечных ВЭЗ служат палетки теоретических кривых четырехточечных ВЭЗ. Однако, сравнивая между собой две полученные на одном центре кривые трехточечных ВЭЗ, мы можем судить о различиях разреза по обе стороны от центра зондирования. Осреднив же значения ρ_k обеих кривых, измеренные на одинаковых разносах, можно получить обобщенную кривую четырехточечного симметричного ВЭЗ.

Если геологические и топографические условия ограничивают возможности применения установки АМNB (как, например, на побережье морей, озер или водохранилищ, в горных районах или долинах, на оползнях и т. д.), выполняют односторонние трехточечные зондирования установкой АМN, $C \rightarrow \infty$.

Использование двухточечных ВЭЗ в целом определяется теми же условиями, что и применение трехточечных зондирований. Их преимущество проявляется особенно в тех случаях, когда покровные

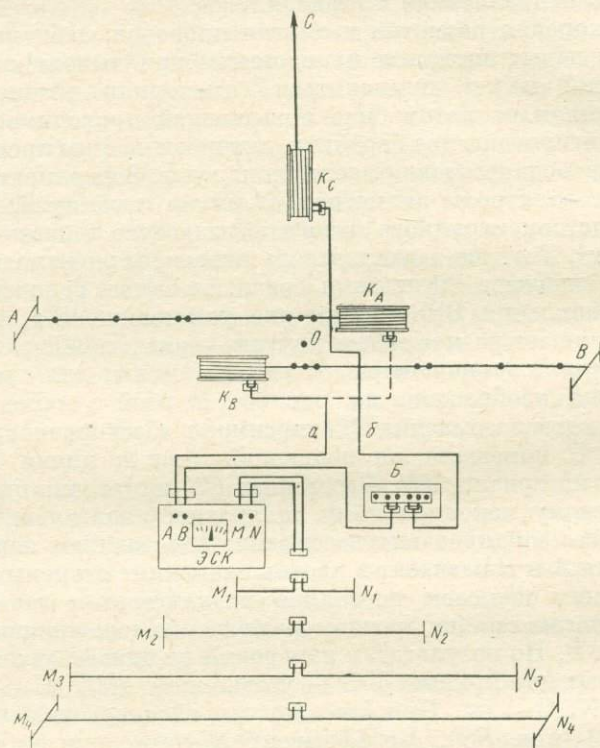


Рис. 65. Схема установки для трехточечного зондирования с ЭСК.

отложения характеризуются резкой неоднородностью условий заземлений электродов М и N, вследствие чего кривые ВЭЗ значительно искажаются.

Дипольные зондирования. Методика полевых работ способом дипольных зондирований определяется разносами установок. Если разносы не превышают 1—2 км, зондирование рациональнее выполнять при помощи обычного комплекта аппаратуры, применяемого при симметричном зондировании. В качестве источника тока при этом используют батареи сухих элементов, а ΔU и I измеряют посредством ЭСК или ИКС. Измерительный диполь обычно остается на месте, а питающий перемещается в том или ином направлении (в зави-

симости от типа установки). Провода, соединяющие заземления питающих диполей с центром установки, наматываются на катушки, расположенные на центре, где помещаются измерительный прибор и батареи. Дипольные зондирования с разносами более 2 км выполняются с электроразведочными станциями.

Дипольные установки по сравнению с симметричными установками обладают рядом технических преимуществ, к которым можно отнести почти полное отсутствие помех, связанных с утечками из питающей цепи, а также с индуктивным влиянием питающей цепи на приемную. Количество проводов, необходимое для производства дипольного зондирования, значительно меньше требуемого для обычного зондирования.

Наряду с этим дипольное зондирование имеет некоторые недостатки. Они обусловлены в первую очередь тем, что напряженность поля диполя убывает обратно пропорционально третьей степени расстояния, т. е. быстрее, чем поле точечного источника. Поскольку $E \approx \Delta U/r_{MN}$, то измеряемые разности потенциалов при работе с дипольными установками уменьшаются очень быстро с увеличением расстояния между питающим и приемным диполями. Быстрое убывание напряженности поля при дипольном зондировании приходится компенсировать увеличением тока в питающем диполе, что влечет за собой увеличение мощности источника тока. Указанной особенностью поля диполя объясняется также повышенная чувствительность дипольных установок к неоднородностям в верхних частях разреза и связанная с этим усложненность графиков кажущегося сопротивления. Особенно резко сказываются неоднородности вблизи заземлений на кривых осевого зондирования.

Малое дипольное зондирование. Методика выполнения малых ДЗ в своих основных положениях — в подготовке участка съемки, в монтаже и подготовке установки на точке зондирования, в порядке и правилах проведения измерений ΔU и I , в контроле за измерениями, проверке прибора и установки — аналогична методике проведения малых зондирований с симметричной установкой, описанной выше. Монтажная схема установки для двухстороннего ДЗ с разносом диполей до 1 км изображена на рис. 66. Монтажные схемы установок для других разновидностей дипольного зондирования (например, дипольно-экваториального) отличаются от изображенной на рис. 66 лишь тем, что вследствие иных ориентаций и направлений перемещения питающих диполей изменяется расположение катушек с проводами питающей линии.

Последовательность операций, выполняемых при дипольном зондировании с малыми разносами, зависит от типа установки и числа измерительных диполей. При работе с двухсторонними установками измерения на одном из питающих диполей рационально проводить в то время, когда изменяют положение второго питающего диполя. Размеры питающих и измерительного диполей при дипольном зондировании приходится со временем увеличивать, потому что измеряемая разность потенциалов, как указывалось выше, быстро

уменьшается с увеличением разносов установки. Предельные размеры диполей должны быть такими, чтобы с достаточной точностью можно было поле двух точечных источников A и B принять за поле диполя; в то же время необходимо, чтобы выполнялось условие $\Delta U/r_{MN} \approx E_{MN}$.

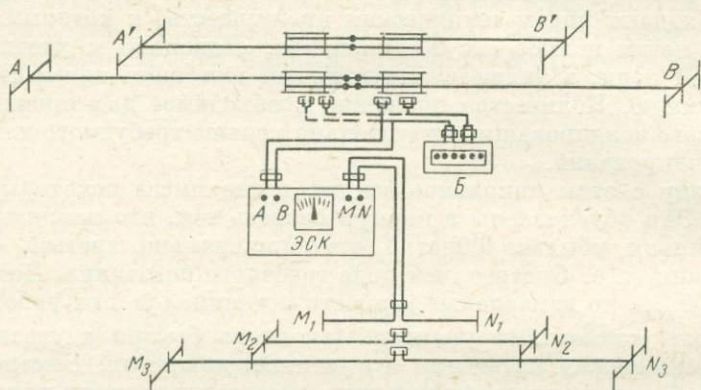


Рис. 66. Схема установки для двухстороннего дипольно-осевого зондирования с ЭСК с разносами диполей до 1 км.

В соответствии с этим условием размеры применяемых дипольных установок должны быть следующими (табл. 4).

Таблица 4

Установка	Величина AB	Величина MN
ДЭЗ	$0,6 \leq AB \leq 1,3r$	$MN \leq 0,2r$
ДАЗ	$AB \leq 0,6r$	$MN \leq 0,2r$
ДОЗ	$AB \leq 0,2r$	$MN \leq 0,2r$

Для того чтобы величина регистрируемых разностей потенциалов в процессе измерений оставалась на уровне, соответствующем требованиям инструкции (0,2—0,3 мВ), с увеличением r время от времени увеличивают также размеры питающего и измерительного диполей. Перекрытия отдельных ветвей (отрезков) кривой дипольного зондирования на графике осуществляют при переходе с одного размера диполя MN на другой или при изменении размера диполя AB .

Поскольку применяемые установки по своим реальным размерам значительно отличаются от бесконечно малых диполей теоретических установок, расстояние r между центрами диполей не соответствует расстояниям между разноименными электродами обоих диполей. В связи с этим введено так называемое действующее расстояние r_d дипольной установки, осредняющее размеры практически применяемой установки (см. рис. 27). При построении кривой ДЗ его откладывают по оси абсцисс как аргумент функции ρ_k .

Для ДЭЗ действующее расстояние $r_d = \sqrt{r^2 + (AB/2)^2}$, для ДОЗ — $r_d = r$, для ДАЗ — $r_d = pr$, где p — множитель, определяемый по специальной номограмме (рис. 67). Для этого находят точку с абсциссой, равной выбранному значению угла θ , и с ординатой, равной отношению $AB/2r$. По кривым, нанесенным на номограмме, находят значение p .

Коэффициент K установок вычисляют либо по общей формуле для коэффициента установок метода сопротивлений (III.2), либо по специальным формулам, полученным из общей формулы применительно к каждому типу установок.

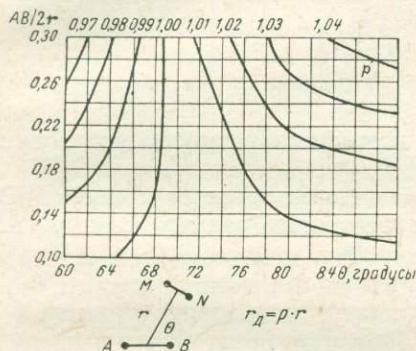


Рис. 67. Номограмма для определения коэффициента p .

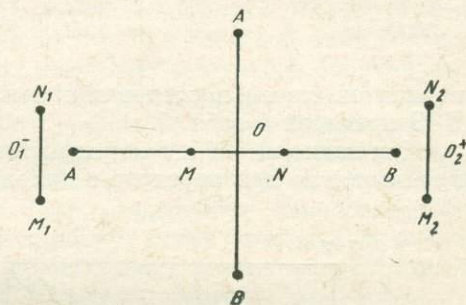


Рис. 68. Схема комплексной установки для двухстороннего дипольно-экваториального зондирования с большими разносами диполей.

Большое дипольное зондирование. Методика выполнения дипольных зондирований с разносами питающих электродов, превышающими 2 км, существенно отличается от методики зондирований с малыми установками. Применение в данном случае автокомпенсаторов невыгодно, так как схемой измерения ΔU и I предусматривается подводка к точке расположения измерительного прибора проводов от питающего и измерительного диполей. Таким образом, не используется одно из преимуществ дипольных зондирований, заключающееся в уменьшении длины соединительных проводов. Кроме того, батареи сухих элементов не обладают необходимой мощностью для создания в земле поля достаточной интенсивности. В связи с этим дипольные зондирования с большими разносами в настоящее время выполняют при помощи электроразведочных станций. Питающий диполь при этом обычно оставляют неподвижным, а перемещают диполь измерительный. Чаще всего применяют двухсторонние экваториальные зондирования.

Для экономии времени измерения на разносах до 1 км проводят при помощи батарей с ИКС или ЭСК в интервалы между измерениями на больших разносах посредством симметричной установки AMNB. Схема такой комплексной установки для двухстороннего экваториального зондирования изображена на рис. 68. Один из возможных

$r, \text{ м}$	$AB, \text{ м}$	$MN, \text{ м}$	$r_d, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$AB, \text{ м}$	$MN, \text{ м}$	$r_d, \text{ м}$
300	400	50	360,5	2 000	3000	400	2 500
500		100	538,5	3 000		400	3 340
800		100	824,6	4 500		600	4 743
500	1000	100	707,1	6 000		600	6 148
		100	943,4	8 000		800	8 139
		100	1300,0	10 000		800	10 112
		300	1676,0	12 000		800	12 091
		400	2061,0	15 000		800	15 075
		400	3041,0				

вариантов схемы последовательного изменения размеров установки ДЭЗ приведен в табл. 5.

Как видно из табл. 5 перекрытия отдельных отрезков кривой ДЭЗ производится при переходе с диполя AB одного размера на другой.

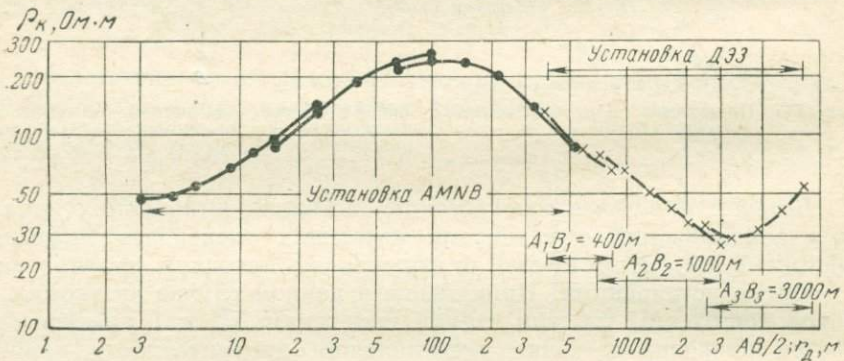


Рис. 69. Кривая ДЭЗ, полученная при измерениях комплексной установкой.

Значения ρ_k , полученные при измерениях установкой АМНВ, наносят на тот же логарифмический бланк (в функции $AB/2$), что и значения ρ_k , полученные при измерении установкой ДЭЗ (в функции r_d), как показано на рис. 69.

Порядок выполнения дипольного зондирования с электроразведочной станцией следующий.

Вдоль профиля наблюдений, который совпадает с направлением оси зондирования, проводят пикетаж через 50—100 м для определения расстояний r между питающим и приемным диполями. В центре зондирования размещают питающий диполь AB (перпендикулярно к линии профиля при ДЭЗ и вдоль профиля при ДОЗ). Подготавливают также малую установку (АМНВ — при ДЭЗ, дипольно-осевую — при ДОЗ) для измерений с ИКС или автокомпенса-

тором; разномы малой установки ориентируют вдоль профиля. Вблизи центра располагают генераторную группу станции, к выходной панели которой подключают диполь AB . В соответствии с принятой схемой изменения размеров установки на соответствующем пикете размещают диполь MN (перпендикулярно к профилю при ДЭЗ, вдоль профиля при ДОЗ), около которого устанавливают полевую лабораторию станции. При двухстороннем зондировании измерения ведут с двумя лабораториями одновременно.

Подготовку генераторной группы и полевой лаборатории к измерениям и сами измерения проводят так же, как и при выполнении симметричных ВЭЗ. Однако расположение генераторной группы и лаборатории на значительном (и возрастающем в процессе зондирования) расстоянии друг от друга обуславливает некоторую специфику работы. Оператор ГГ и оператор ИЛ свои действия согласовывают по радио; подача пробных и токовых импульсов производится оператором ГГ; регистрация рабочих и градуировочных токовых импульсов проводится отдельно от записи ΔU также оператором ГГ при помощи осциллографа генераторной группы. При этом токовые рабочие и градуировочные импульсы регистрируют не на каждом разноме, а величину рабочего тока определяют непосредственно по прецизионному стрелочному прибору, шунт которого включают в цепь AB . Показания прибора записываются оператором ГГ и сообщаются им по радио оператору ИЛ и интерпретатору.

Для выбора длительности рабочих импульсов время становления t_c ориентировочно может быть подсчитано по формуле (IV.30); при этом коэффициент будет иметь значения 0,75 (для ДЭЗ) и 0,94 (для ДОЗ).

После проявления и проверки качества осциллограмм полевые лаборатории перемещают на следующие пикеты профиля.

На обратной стороне осциллограмм ΔU и I заполняют их паспорта, затем регистрируют в журнале и обрабатывают. По результатам вычислений ρ_k строят плюсовую и минусовую кривые ДЗ, а также среднюю кривую, для которой значения $\rho_{ксп}$ вычисляют по формуле

$$\rho_{ксп} = (\rho_k^+ + \rho_k^-) / 2.$$

На местности, где передвижение станции возможно только по дорогам и поэтому нельзя прокладывать прямолинейные профили, применяют азимутальную установку. Из формулы (IV.26) следует, что кривая дипольно-азимутального зондирования не зависит от угла θ . Вследствие этого центры диполей AB и MN можно располагать вдоль криволинейного профиля (дороги). Однако напряженность E_θ , как это видно из формулы (IV.24), зависит от $\sin \theta$; поэтому, для того чтобы измеряемые разности потенциалов были большими и тем самым измерения более точными, угол θ следует выбирать в пределах $70-110^\circ$ (но угол γ всегда должен быть равен 90°).

Для проведения ДАЗ проводят пикетаж дороги, который переносят затем на топопланшет. При помощи этого планшета намечают

схему расположения питающего и приемных диполей и графически определяют r и θ (рис. 70). На этом основании составляют программу работ по следующей форме.

ДАЗ	Пикет центра
Азимут	
АВ	

№ замера	№ пикета	r, м	θ , градусы	Азимут MN	Примечание

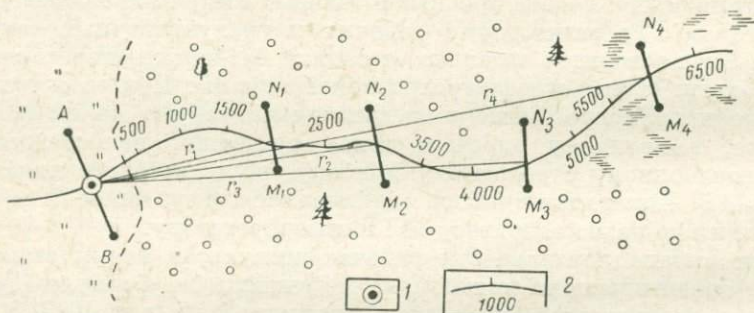


Рис. 70. Схема выполнения дипольно-азимутального зондирования.
1 — пикет центра ДАЗ; 2 — линия дороги и пикетаж.

Этой программой руководствуются операторы при выполнении ДАЗ.

При проведении зондирований оси диполей AB и MN экваториальной и азимутальной установок следует направлять по простиранию пород. Необходимо избегать пересечения установками участков с тектоническими нарушениями, с резкими формами рельефа дневной поверхности.

§ 3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Интерпретацию результатов вертикального зондирования проводят с целью построения по кривым зондирования геологического разреза исследованной площади.

Основой интерпретации являются геологические представления о характере разреза и сведения об удельном сопротивлении пород, которыми всегда с той или иной степенью детальности располагает геофизик, работающий в данном районе. При интерпретации электрозведочных наблюдений широко используется понятие об о п о р -

ном электрическом горизонте, под которым подразумевается горизонт, хорошо выделяющийся в разрезе по удельному сопротивлению и обладающий достаточной мощностью для того, чтобы отчетливо выявляться на кривых ВЭЗ. Этот горизонт должен участвовать в строении изучаемых структур, чтобы по его поведению можно было судить об особенностях данной структуры.

Наилучшими опорными горизонтами среди терригенных пород являются глины, характеризующиеся низким удельным сопротивлением и фациальной выдержанностью. Среди карбонатных пород опорными горизонтами обычно могут служить пласты гипсов, ангидритов и массивных известняков. Хорошим опорным горизонтом часто являются породы кристаллического фундамента.

Отсутствие четко проявляющихся в разрезе и хорошо прослеживающихся по простиранию опорных горизонтов существенно затрудняет интерпретацию. В таких условиях необходимо особенно тщательно выявлять и учитывать изменение параметров горизонтов разреза по площади.

Приемы интерпретации результатов вертикальных электрических зондирований могут быть разделены на качественные и количественные. Они тесно связаны между собой и взаимно дополняют друг друга.

Качественная интерпретация заключается в сопоставлении зондирований по форме кривых ρ_k и в изображении пространственных закономерностей в распределении тех или иных их особенностей в виде карт типов кривых, карт продольной проводимости или поперечного сопротивления, карт изомов, разрезов ρ_k и других графиков. Отражая особенности геоэлектрического разреза на площади исследований, качественная интерпретация позволяет: а) составить общее представление о геологическом строении исследуемой площади; б) качественно охарактеризовать поведение опорного электрического горизонта и, таким образом, выделить геологические структуры, представляющие практический интерес; в) получить качественную характеристику фациального изменения отдельных горизонтов в пределах исследованной площади (например, выделить участки, обогащенные песчаной фракцией, зоны трещиноватости и т. п.).

Количественная интерпретация проводится с целью определения параметров геоэлектрического разреза — мощностей и сопротивлений горизонтов, слагающих разрез, а также глубин их залегания.

Качественная интерпретация кривых ВЭЗ. Рассмотрим основные приемы качественной интерпретации.

Карта типов кривых. По распределению в пределах изученной площади кривых различного типа можно судить о характере разреза данной площади и закономерностях его изменений.

Для построения карты типов кривых точки, в которых проводились зондирования, наносят на план; около этих точек в уменьшенном масштабе вычерчивают соответствующие кривые ВЭЗ

или обозначают условным знаком их тип. Затем выделяют площади, где получены однотипные кривые. Исходя из имеющихся сведений о геологическом строении и электрических свойствах пород, намечают связь между типом кривых и строением той площади, в пределах которой получены кривые данного типа. Таким образом, карта типов кривых приобретает конкретный геологический смысл.

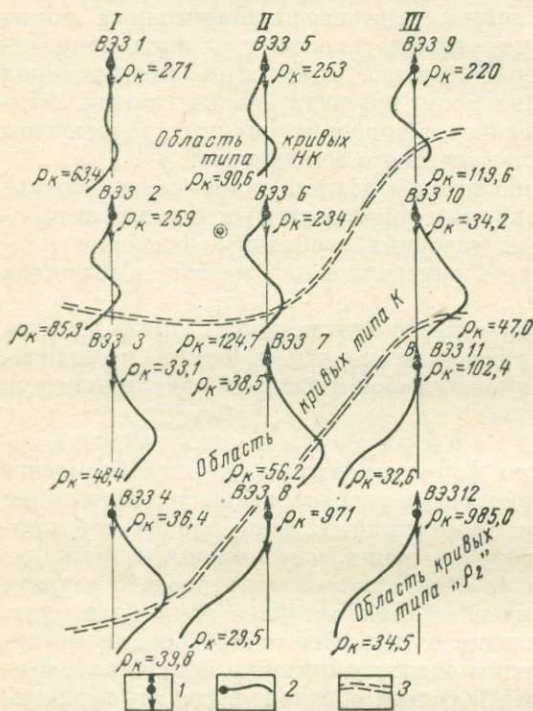


Рис. 71. Карта типов кривых ВЭЗ.

1 — точки ВЭЗ и направление разносов; 2 — кривая ВЭЗ со значением ρ_k (в Ом·м) на начальном и конечном разносах; 3 — границы областей однотипных кривых ВЭЗ; I—III — профили.

двухслойные кривые. Из рис. 72 можно сделать заключение, что в области распространения кривых типа НК под покровные отложения выходят пески, в области распространения кривых типа К — глины и на остальной площади — известняки.

Карты типов кривых ВЭЗ позволяют выделять участки, сложенные определенными литологическими разновидностями пород, оконтуривать площади залегания пресных водоносных горизонтов и т. п.

Карты равных значений продольной проводимости S и поперечного сопротивления T . Карты равных значений S обычно строят в том случае, когда сопротивление опорного электрического горизонта

На рис. 71 изображена карта типов кривых, а на рис. 72 — схематический геологический разрез по одному из профилей той же площади. Над разрезом, как это часто делается, изображены кривые ВЭЗ, полученные в соответствующих точках профиля. Геоэлектрический разрез имеет четыре слоя с соотношением удельных сопротивлений $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$. В точке ВЭЗ 7 эрозионный срез обнажает глины, а в точке ВЭЗ 8 — известняки. Соответственно этому по направлению с севера на юг меняется тип кривых — от четырехслойных типа НК до двухслойных. На карте типов кривых вся исследованная площадь разделяется на три части: в пределах первой части получены кривые типа НК, в пределах второй — кривые типа К и, наконец, на остальной площади —

намного больше сопротивления пород, перекрывающих этот горизонт.

Из выражения (IV.15) следует, что при условии постоянства продольного сопротивления ρ_1 продольная проводимость S пропорциональна суммарной мощности пород, покрывающих опорный горизонт. Отсюда следует, что карта, на которую нанесены изолинии S , будет характеризовать рельеф опорного горизонта, причем тем точнее, чем выдержаннее сопротивление пород на исследуемой площади.

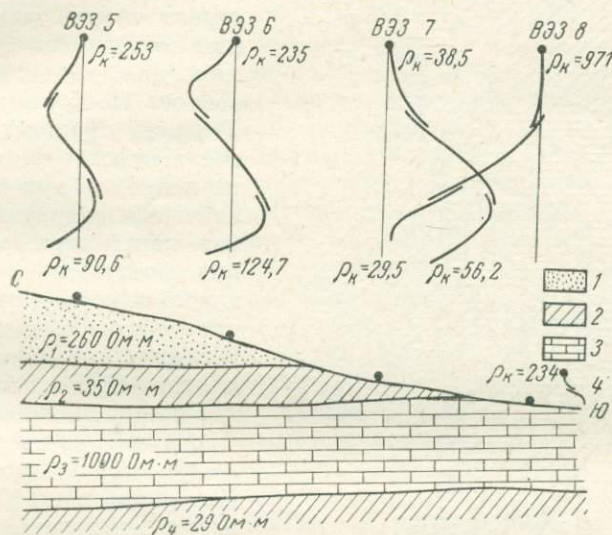


Рис. 72. Кривые ВЭЗ и схематический геологический разрез по профилю П.

1 — пески; 2 — глины; 3 — известняки; 4 — кривая ВЭЗ и значения ρ_k (в Ом·м) на начальном и конечном разносах.

Для построения карты S по правой асимптотической ветви каждой кривой ВЭЗ (в случае подстилающего горизонта бесконечно высокого сопротивления) определяют значение продольной проводимости, которое численно равно абсциссе точки пересечения наклонной асимптоты правой ветви кривой с горизонтальной осью бланка. Значение S выписывают на плане около точки соответствующего зондирования и в полученном поле чисел проводят изолинии S . Сечение изолиний выбирают в соответствии с характером изменения S , требуемой детальностью исследования структуры и точностью измерений.

Если по результатам зондирований, проведенных у скважин или в других точках с известным геологическим разрезом, доказано постоянство среднего продольного сопротивления в пределах исследуемой площади, то от карты S легко можно перейти к карте изолиний суммарной мощности пород надопорных горизонтов.

Для этого необходимо в каждой точке величину S умножить на ρ_l и по полученным таким образом мощностям построить карту изолиний равных мощностей.

На рис. 73 изображена карта продольной проводимости для одного из участков Подмосковского бассейна, на которой область наименьших значений S соответствует сводовой части поднятия высокоомных девонских отложений.

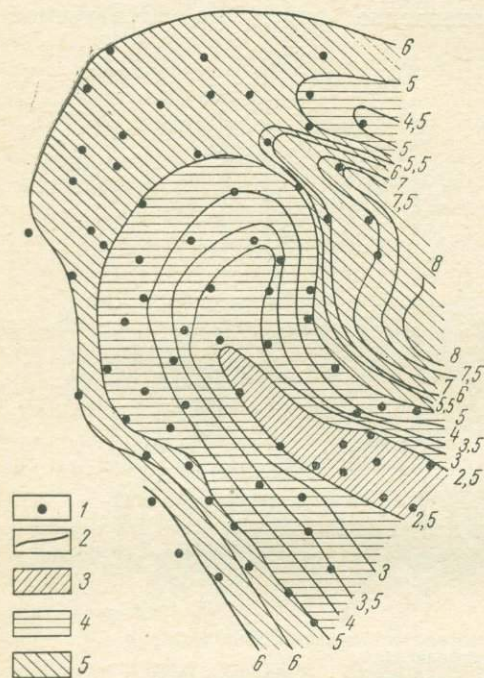


Рис. 73. Карта продольной проводимости для одного из участков Подмосковского бассейна.

1 — точки ВЭЗ; 2 — линии равных значений S ; зоны значений: 3 — $S < 2,5$ См, 4 — $S = 2,5 \div 5$ См, 5 — $S > 5$ См.

значительно реже, чем при профилировании, карты изоом, построенные по данным ВЭЗ, по детальности уступают аналогичным картам, построенным по данным профилирования. Однако они обладают тем преимуществом, что их можно строить для различных разносов питающих заземлений и, таким образом, при помощи их характеризовать изменение разреза в вертикальном направлении.

Интерпретация карт изоом, как это будет показано в главе V, позволяет ориентировочно судить о положении погребенных структур.

Карты равных значений $\rho_{k \max}$ и $\rho_{k \min}$. Если зондирование выполняется над многослойным разрезом, кажущиеся сопротивления по величине тем ближе к истинному сопротивлению промежуточных

Аналогичным образом строят карту равных значений поперечного сопротивления для отдельных горизонтов. Поскольку величина T равна произведению мощности пласта на его сопротивление, то при постоянном значении сопротивления такая карта отражает изменение мощности соответствующего пласта, а при условии постоянства мощности — изменение его удельного сопротивления и, следовательно, фациального состава.

Карты равных значений кажущегося сопротивления. Методика построения карт изоом аналогична методике составления карт изоом по данным профилирования (см. рис. 92). По результатам ВЭЗ можно построить карты изоом при любом разносе установки для зондирования. Но в связи с тем, что сеть точек при зондировании

горизонтов, чем больше мощность этих горизонтов по сравнению с мощностью залегающих выше пород.

Если со всех кривых ВЭЗ, полученных на некоторой площади, снять значения $\rho_{k \max}$ (при высокоомном промежуточном горизонте) или значения $\rho_{k \min}$ (при низкоомном промежуточном горизонте), то карты равных значений этих величин будут качественно характеризовать изменение мощности того горизонта, с которым связано наличие максимума или минимума ρ_k на кривой ВЭЗ. На подобных картах увеличение значения $\rho_{k \max}$ (или уменьшение $\rho_{k \min}$) будет свидетельствовать об увеличении мощности изучаемого горизонта или об уменьшении глубины его залегания.

Разрезы кажущихся сопротивлений. Несмотря на то, что кажущееся сопротивление сложным образом зависит от величины разностей и параметров геоэлектрического разреза, закономерность пространственного распределения значений ρ_k можно использовать для качественной характеристики геологического разреза изучаемого участка путем построения разрезов кажущихся сопротивлений.

Для построения такого разреза точки ВЭЗ наносят на топографический профиль; в каждой точке по вертикальной оси вниз откладывают в логарифмическом масштабе значения полуразностей питающих электродов, при которых в процессе зондирования измерялось ρ_k , и в соответствующих точках этой оси пишут то значение ρ_k , которое было получено при данном полуразносе. В полученном поле чисел проводят изолинии ρ_k . Конфигурация этих изолиний качественно характеризует геологический разрез по профилю. Так, например, горизонт высокого удельного сопротивления отразится на разрезе ρ_k в виде зоны повышенных значений этой величины. Появление на разрезе локальных зон пониженного сопротивления может служить признаком присутствия на глубине рудных тел, глинистых линз; линейными крутопадающими зонами низких значений ρ_k отмечаются тектонические нарушения и т. п.

В результате качественной интерпретации кривых ВЭЗ электро-разведчик получает представление об особенностях геологического строения района работ, выделяет площади с определенными типами пород; выявляет участки, на которых кривые оказались искаженными, что указывает на наличие резких неоднородностей (тектонических нарушений, выклиниваний отдельных горизонтов, крупных локальных включений и т. п.), получает возможность судить, насколько выдерживаются по площади удельные сопротивления пород, слагающих разрез. Все эти данные помогают в последующей количественной интерпретации.

Количественная интерпретация кривых ВЭЗ. Количественная интерпретация кривых ВЭЗ проводится с целью определения параметров горизонтов, слагающих изучаемый разрез, а именно h_1 , ρ_1 , h_2 , ρ_2 и т. д.

Зависимость между кажущимся сопротивлением ρ_k и параметрами горизонтов разреза определяется выражением (IV.3) для двухслойного и выражением (IV.4) для трехслойного разрезов.

Обычно для количественной интерпретации кривых ВЭЗ применяется так называемый палеточный способ, заключающийся в сравнении наблюдаемых (полевых) кривых зондирования с теоретически рассчитанными для заданных параметров разреза и собранными в палетки.

То обстоятельство, что вид кривой зондирования определяется не абсолютными значениями параметров разреза, а их отношениями h_2/h_1 , h_3/h_1 , \dots , ρ_2/ρ_1 , ρ_3/ρ_1 , \dots позволяет выгодно использовать билогарифмический масштаб изображения кривых для упрощения техники интерпретации. Действительно, при расчете теоретических кривых ВЭЗ параметры первого слоя h_1 и ρ_1 приняты равными единице. Если наблюдаемая кривая будет получена над разрезом с параметрами, совпадающими с параметрами разреза, для которого рассчитана теоретическая кривая, то, очевидно, крест палетки при совмещении кривых попадет на бланк с наблюдаемой кривой в точку с координатами (1, 1).

Пусть теперь в точке зондирования удельное сопротивление верхнего слоя будет в a раз больше и его мощность в b раз больше, чем у разреза, для которого построена теоретическая кривая, т. е. $\rho_1 = a$ и $h_1 = b$. Увеличение в арифметическом масштабе в a или b раз соответствует в логарифмическом масштабе изменению на отрезок, равный $\lg a$ или $\lg b$. Следовательно, чтобы совместить в этом случае теоретическую и полевую кривые с равными значениями модулей, крест палетки необходимо сместить по оси ординат билогарифмического бланка на отрезок, равный $\lg a$, и по оси абсцисс на отрезок, равный $\lg b$, т. е. поместить его в точку бланка с координатами (a, b) . Иначе говоря, ордината оси абсцисс палетки на бланке наблюдаемой кривой будет равна удельному сопротивлению верхнего слоя исследуемого разреза, а абсцисса оси ординат — мощности этого слоя. Зная модули теоретической кривой, с которой оказалась совмещенной наблюдаемая кривая зондирования, можно вычислить остальные параметры разреза.

Если производится интерпретация двухслойной кривой, то после определения h_1 и ρ_1 остается вычислить только значение ρ_2 , которое определяется из соотношения $\rho_2 = \mu_1 \rho_1$. Величину ρ_2 можно определить также по правой асимптоте палеточной кривой.

При интерпретации трехслойных кривых при определении h_2 нужно учитывать принцип эквивалентности. Действительно, совпадение теоретической и наблюдаемой кривых означает, что соответствующие им разрезы (теоретический и исследуемый) при одинаковом значении ρ_1 и ρ_3 обладают либо одинаковой продольной проводимостью второго слоя S_2 (разрезы типа Н и А), либо одинаковым поперечным сопротивлением T_2 (разрезы К и Q). Таким образом, для кривых типов Н и А можно в соответствии с выражением (IV.28) написать $h_{2н}/\rho_{2н} = h_{2т}/\rho_{2т}$, где индекс «н» относится к наблюдаемой кривой, а индекс «т» — к теоретической. Отсюда

$$h_{2н} = \rho_{2н} \frac{h_{2т}}{\rho_{2т}} = \rho_{2н} \frac{h_1 v_{1т}}{\rho_1 \mu_{1т}} = \rho_{2н} \frac{v_{1т}}{\mu_{1т}} S_1. \quad (\text{IV.31})$$

Так как h_1 и ρ_1 уже найдены при интерпретации, а v_{1T} и μ_{1c} — модули теоретической кривой — известны, то это равенство позволяет легко вычислить искомую мощность второго слоя по его удельному сопротивлению¹.

Аналогично можно решить задачу для кривых типов К и Q; в соответствии с выражением (IV.29)

$$h_{2H}\rho_{2H} = h_{2T}\rho_{2T},$$

$$h_{2H} = \frac{h_1 v_{1T} \rho_1 \mu_{1T}}{\rho_{2H}} = \frac{v_{1T} \mu_{1T}}{\rho_{2H}} T_1. \quad (\text{IV.32})$$

И в этом случае для определения мощности промежуточного (второго) горизонта необходимо знать его удельное сопротивление.

Эти общие положения позволяют нам теперь перейти к основным приемам интерпретации двухслойных и трехслойных кривых зондирования при помощи альбома палеток ВСЕГЕИ.

При интерпретации кривых ВЭЗ необходимо соблюдать следующие правила.

1. Координатные оси билогарифмического бланка с наблюдаемой кривой и оси палеток при совмещении кривых должны быть строго параллельны.

2. Кривые нужно совмещать так, чтобы с теоретической кривой совпадали правые части каждого отрезка наблюдаемой кривой. Как указывалось выше, теоретические кривые являются предельными, т. е. они рассчитаны для бесконечно малых по сравнению с AB расстояний MN ; у полевых кривых отношение MN/AB уменьшается в пределах каждого отрезка кривой, полученного при одном равноразном MN . Следовательно, правые части каждого отрезка полевой кривой зондирования ближе подходят к теоретической кривой, чем их левые части.

Интерпретация двухслойных кривых. Наблюдаемую кривую накладывают на палетку и добиваются наилучшего совпадения наблюдаемой кривой (рис. 74, кривая *a*) с одной из палеточных кривых. Отмечают положение креста палетки на бланке двумя стрелками. Координаты креста палетки на бланке с наблюдаемой кривой дают значение h_1 и ρ_1 . Величину ρ_2 находят, как указано выше, по ординате правой асимптоты или вычисляют по модулю теоретической кривой, с которой совместились интерпретируемая кривая.

Если наблюдаемая кривая не совмещается с палеточными, то это означает, что на палетке нет соответствующей ей по модулю μ_1 кривой. В этом случае интерпретируемую кривую располагают между двумя палеточными кривыми. Модуль μ_1 находят путем интерполяции (рис. 74, кривая *b*).

Интерпретация трехслойных кривых. Начинается с нахождения параметров верхнего горизонта.

¹ О способах определения удельного сопротивления пород будет сказано в § 4 настоящей главы.

Для определения h_1 и ρ_1 бланк накладывают на палетку « ρ_2 » и, добившись наилучшего совмещения левой ветви наблюдаемой кривой с одной из кривых палетки, по кресту последней находят искомые величины. Зная ρ_1 , а также ρ_2 и оценив по правой асимптоте кривой значение ρ_3 , выбирают необходимую трехслойную палетку. Дальнейший процесс интерпретации трехслойных кривых имеет некоторые различия в зависимости от типа интерпретируемых кривых. Мы ограничимся рассмотрением некоторых примеров.

Интерпретация кривых типа Н. Необходимую трехслойную палетку подбирают сначала по модулю μ_2 . Если правая

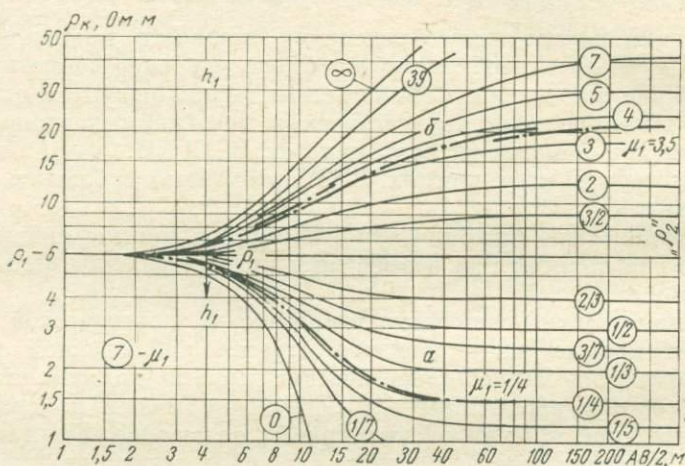


Рис. 74. Пример интерпретации двухслойных кривых ВЭЗ.

ветвь наблюдаемой кривой идет круто вверх, т. е. $\rho_3 \gg \rho_1$, то выбирают группу палеток типа Н — μ_1 — ∞ ; при $\rho_3 \approx \rho_1$ используют палетки Н — μ_1 — ρ_1 ; в том случае, если $\rho_2 < \rho_3 < \rho_1$, применяют палетки Н — μ_1 — $\sqrt{\rho_2}$. Окончательный выбор палетки в группе осуществляют по значению модуля μ_1 .

На выбранную палетку накладывают бланк так, чтобы левая асимптота полевой кривой совпала с линией ρ_1 палетки. Перемещая бланк вправо или влево, добиваются наилучшего совмещения левой ветви и области минимума ρ_k наблюдаемой кривой с одной из кривых палетки (при несоответствии модулей ν_1 кривая должна вписаться между двумя палеточными кривыми). Затем отмечают вертикальными стрелками (рис. 75) точки пересечения интерпретируемой кривой с линиями h_1 , h_2 и m_2 палетки. Абсциссы этих точек дают соответствующие значения мощностей первого и второго слоев и их суммарной мощности или глубины залегания кровли опорного горизонта.

В том случае, когда значение μ_2 оказывается между палеточными значениями этого модуля, выбирают две смежные по модулю μ_2 палетки, интерпретируют по обеим и затем результат осредняют.

Пример 1. Проинтерпретировать кривую, изображенную на рис. 75, для которой $\rho_2 = 10$ Ом·м.

По палетке « ρ_2 » находим значения $\rho_1 = 40$ Ом·м и $h_2 = 2,4$ м, тогда μ_1 кривой оказывается равным $10/40 = 1/4$. Поскольку правая ветвь кривой идет полого и выходит на горизонтальную асимптоту, близкую к значению ρ_1 , выбираем палетку типа Н — $\frac{1}{4} - \rho_1$. Совместив линию ρ_1 палетки с линией бланка $\rho_k = 40$ Ом·м и добившись совпадения левой ветви кривой и области минимума, получаем значения $h_2 = 12$ м и $m_2 = 14,4$ м.

Проверяем результаты интерпретации по значению продольной проводимости второго слоя. По полученным данным

$$S_2 = h_2 / \rho_2 = 12 / 10 = 1,2 \text{ См.}$$

Теперь найдем значение S_2 при помощи той же палетки Н — $\frac{1}{4} \rho_1$, по которой проводилась интерпретация. Для этого через точку пересечения интерпретируемой кривой с линией S_2 палетки проведем прямую линию вниз влево

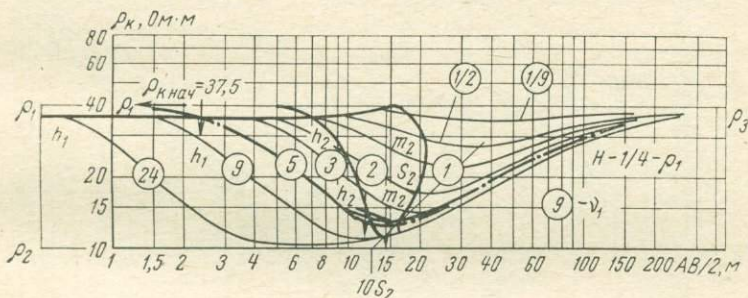


Рис. 75. Пример интерпретации кривой типа Н с конечным сопротивлением подстилающего слоя.

под углом 45° до пересечения с осью абсцисс бланка. Абсцисса точки пересечения дает величину S_2 . Нетрудно убедиться, что точки пересечения той же наклонной прямой с десятичными линиями бланка ($\rho = 10, 100$ и т. д.) имеют абсциссы, соответственно равные $10 \cdot S_2, 100 \cdot S_2$ и т. д. В нашем случае, как это видно на рис. 75, величина S_2 также равна $1,2$ См, что подтверждает правильность интерпретации.

Аналогичным способом можно по палетке найти величину суммарной продольной проводимости S (на палетках типа Н — $\mu_1 - \infty$ прямую S проводят как касательную к правой ветви палеточных или интерпретируемых кривых).

Если модуль μ_1 палетки совпадает с модулем наблюдаемой кривой, то задача интерпретации решена. Если же модули различны, то выбирают наиболее близкую по модулю μ_1 палетку и проделывают описанные выше операции. Однако в этом случае найденная на палетке мощность эквивалентного слоя h_2 уже не будет соответствовать мощности второго слоя $h_{2н}$ изучаемого разреза. Эту мощность вычисляют по формуле (IV.31), где $\nu_{1г}$ и $\mu_{1г}$ — модули палеточной кривой; $\rho_{2н}$ — удельное сопротивление промежуточного слоя наблюдаемой кривой.

Пример 2. Дана кривая (рис. 76), полученная над разрезом, значение ρ_2 которого равно 24 Ом·м. По палетке « ρ_2 » находим, что $\rho_1 = 200$ Ом·м и $h_1 = 5,5$ м (в данном случае пользоваться двухслойной палеткой для определения ρ_1 не обязательно, так как левая ветвь кривой достаточно четко выходит

на горизонтальную асимптоту $\rho_1 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Поскольку правая ветвь идет круто вверх и μ_1 кривой оказывается равным $24/200 = 1/8$, выбираем трехслойную палетку с наиболее близким значением модуля $\mu_1 = 1/9$, а именно палетку $H - 1/9 - \infty$. Накладывая бланк на палетку так, чтобы линия ρ_1 трехслойной палетки совпала с линией бланка $\rho_K = 200 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, добиваемся совмещения левой и средней частей кривой с одной из кривых палетки. Как видно на рис. 76, интерпретируемая кривая вписывается в палетку между кривыми, имеющими модуль ν_1 соответственно 5 и 3. По пересечению наблюдаемой кривой с линией h_2 палетки находим, что $h_{2T} = 22 \text{ м}$, откуда $\nu_{1T} = 4$. Поскольку палетка имеет модуль μ_1 , значение которого отличается от действительного значения этого модуля у интерпретируемой кривой, истинную величину h_{2H} находим по формуле (IV.31):

$$h_{2H} = \rho_{2H} \frac{\nu_{1T}}{\rho_{T1}} S_1 = 24 \cdot \frac{4 \cdot 5,5}{\frac{1}{9} \cdot 200} = 24 \text{ м}.$$

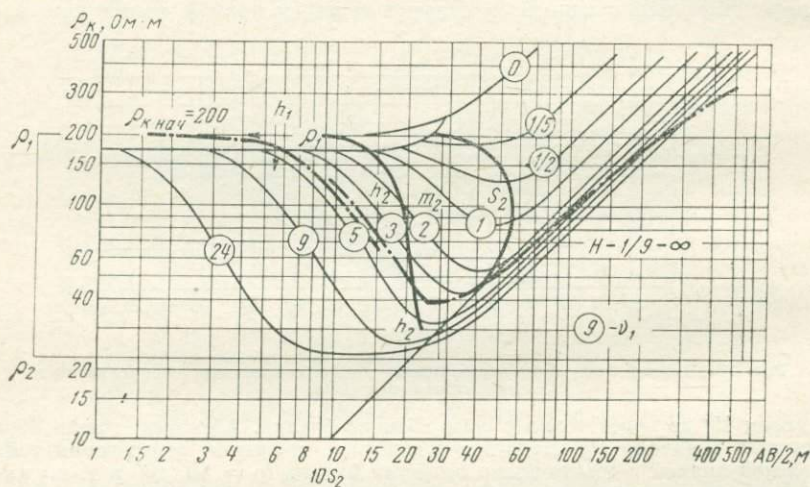


Рис. 76. Пример интерпретации кривой типа H с бесконечным сопротивлением подоглающего слоя.

Искомую величину h_{2H} можно найти и несколько иным путем. Так как продольная проводимость второго слоя палеточной кривой S_{2T} равна продольной проводимости наблюдаемой кривой S_{2T} , то

$$h_{2H} = S_{2T} \rho_{2H} = 1 \cdot 24 = 24 \text{ м},$$

где S_{2T} снимается с бланка посредством проведения прямой S_2 .

Интерпретация кривых типа К. Необходимая для интерпретации палетка также подбирается по значениям модулей μ_1 и μ_2 . Если правая ветвь интерпретируемой кривой уходит круто вниз, то выбирают одну из палеток $K - \mu_1 - 0$; при $\rho_3 \approx \rho_1$ применяют палетки типа $K - \mu_1 - \rho_1$; наконец, если $\rho_3 > \rho_1$, то используют палетки типа $K - \mu_1 - \sqrt{\rho_2}$. При наложении бланка на палетку линию ρ_1 палетки совмещают с левой асимптотой интерпретируемой кривой. Передвигая бланк горизонтально, добиваются

совмещения левой ветви кривой и области максимума ρ_K . По абсциссам точек пересечения наблюдаемой кривой с линиями h_1 , h_2 и m_2 палеток определяют мощности соответствующих горизонтов и глубину залегания кровли третьего горизонта. При помощи прямой S и прямой T_2 , которая проводится под углом 45° вниз направо через точку пересечения линии T_2 палетки с наблюдаемой кривой, можно определить S и T_2 .

Пример 3. Проинтерпретировать кривую типа К, полученную над разрезом, у которого $\rho_2 = 380$ Ом·м (рис. 77).

По левой ветви кривой, выходящей на горизонтальную асимптоту, определяем $\rho_1 = 20$ Ом·м, что позволяет сразу приступить к выбору трехслойной

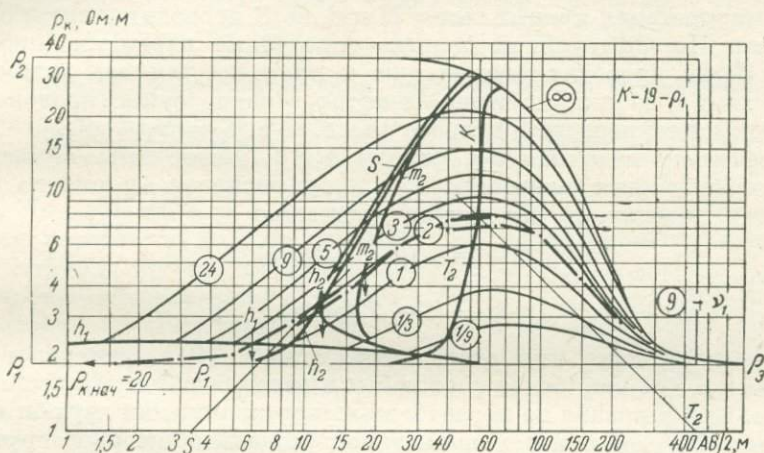


Рис. 77. Пример интерпретации кривой типа К.

палетки, не прибегая к двухслойной. По ходу правой ветви кривой можно установить, что значение ρ_2 близко к величине ρ_1 . Так как модуль μ_1 кривой оказывается равным 19, выбираем палетку К—19— ρ_1 . Совмещая линию ρ_1 палетки с линией бланка $\rho_K = 20$ Ом·м, получаем совпадение интерпретируемой кривой с той кривой палетки, которая имеет модуль $\nu_1 = 2$. По пересечению наблюдений кривой с линиями палетки h_1 , h_2 и m_2 определяем, что $h_1 = 6$ м, $h_2 = 12$ м и $m_2 = 18$ м. Проверя прямые S и T_2 , снимаем с бланка значения S и T_2 разреза. Значение величины T_2 позволяет проверить результаты интерпретации. Действительно, $T_2 = 4600$ Ом·м², откуда $h_2 = T_2/\rho_2 = 4600/380 = 12$ м.

При отсутствии в альбоме палетки с нужным модулем μ_1 выбирают ближайшую по значению μ_1 палетку и по найденным по этой палетке величинам ν_{1T} , h_1 , ρ_1 и по модулю μ_{1T} вычисляют значение h_{2H} по формуле (IV.32).

Кривые типов А и Q интерпретируют аналогично. При отсутствии палеток с нужным значением модуля μ_1 также выбирают палетки с наиболее близкой величиной μ_1 и мощность второго слоя вычисляют соответственно по формулам (IV.31) и (IV.32).

Интерпретация кривых по S. В тех случаях, когда подстилающий горизонт представлен породами практически бесконечно высокого сопротивления, можно применять более простой способ

интерпретации по величине продольной проводимости S . Этот способ может быть использован при интерпретации двухслойных кривых и кривых типов Н и А.

Выше было указано (см. § 1 настоящей главы), что наклонная асимптота кривых зондирования, отвечающих разрезам с подстилающим слоем бесконечно большого сопротивления, является одновременно прямой S разреза.

В связи с этим для интерпретации двухслойной кривой, имеющей $\mu_1 = \infty$, нужно провести касательную к правой ветви под углом 45° . Пересечение касательной с ординатой бланка, равной ρ_1 , дает искомое значение мощности верхнего слоя h_1 (см. рис. 49).

Интерпретация кривых типов Н и А по S проводится следующим образом. По двухслойной палетке определяют параметры первого слоя. Затем проводят касательную к правой ветви под углом 45° и снимают с бланка значение S , которое равно сумме продольных проводимостей первого и второго слоев, т. е. $S = S_1 + S_2$.

Поскольку величина S_1 , равная h_1/ρ_1 , может быть вычислена по уже найденным значениям h_1 и ρ_1 , а величина ρ_2 должна быть известна, значение h_2 находят из уравнения

$$S = h_1/\rho_1 + h_2/\rho_2,$$

откуда

$$h_2 = (S - h_1/\rho_1) \rho_2.$$

Интерпретация четырехслойных кривых. Эта интерпретация является операцией более сложной и в деталях нами не рассматривается. Она основана на последовательном применении двух- и трехслойных палеток, при помощи которых раздельно интерпретируются левая часть (соответствующая первому, второму и третьему слоям) и правая часть (соответствующая второму, третьему и четвертому слоям) наблюдаемой четырехслойной кривой. Непременным условием интерпретации четырехслойных кривых является знание удельного сопротивления промежуточных горизонтов ρ_2 и ρ_3 , желательно также знать ρ_4 подстилающего горизонта.

По тем же правилам и при помощи тех же палеток четырехточечных ВЭЗ интерпретируются кривые трехточечных и двухточечных зондирований.

Изображение результатов количественной интерпретации. По результатам количественной интерпретации кривых зондирований строят геоэлектрические разрезы и структурные карты. Для построения разреза проводят линию дневной поверхности и наносят положение точек ВЭЗ, от которых по вертикали вниз в выбранном масштабе откладывают мощности геоэлектрических горизонтов. Соединяя полученные точки, получают линии, соответствующие положению кровли выделенных геоэлектрических горизонтов в разрезе (рис. 78).

Если эти горизонты можно отождествить с определенными стратиграфическими или литологическими горизонтами, то геоэлектрический разрез приобретает конкретный геологический смысл.

Для построения структурной карты по высотным отметкам точек ВЭЗ и мощностям горизонтов предварительно вычисляют абсолютные отметки кровли выделенных по результатам зондирования горизон-

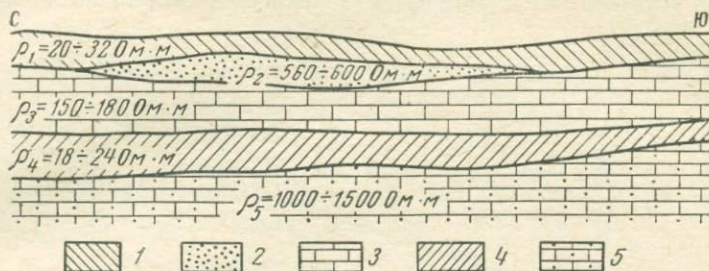


Рис. 78. Геоэлектрический разрез одного из участков Подмосковского бассейна.

1 — четвертичные отложения; 2 — пески верхневолжского яруса; 3 — известняки окской свиты; 4 — песчано-глинистые отложения тульской и продуктивной свит; 5 — известняки упинской свиты.

тов. На план наносят положение этих точек. Около них пишут отметки горизонтов и в полученном поле чисел проводят изогипсы. Структурная карта, построенная по кровле высокоомного опорного горизонта, изображена на рис. 79.

Качественная и количественная интерпретация кривых ДЗ. При интерпретации кривых дипольных зондирований применяются те же способы, что и при интерпретации кривых симметричных ВЭЗ. При этом, как указывалось выше (см. § 1 настоящей главы), для интерпретации кривых ДЭЗ и ДАЗ используются палетки симметричных ВЭЗ, а для интерпретации кривых ДОЗ — палетки специально рассчитанных теоретических кривых ДОЗ.

Одинаковыми являются также способы и графические формы изображения результатов ДЗ и ВЭЗ. Однако применение двухсторонних установок для ДЗ обуславливает некоторые специфические особенности интерпретации. Прежде всего появляется возможность выявления изменений разреза в горизонтальном направлении. Для этого сравниваются плюсовая и минусовая кривые ДЭЗ. Изменение формы правой ветви кривых указывает на существенные различия разреза (рис. 80) по обе стороны от пикета зондирования: вправо

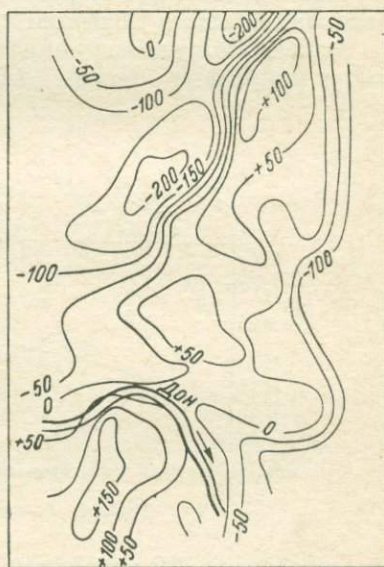


Рис. 79. Структурная карта по кровле высокоомного опорного горизонта.

от центра геоэлектрический разрез типа АА, влево — типа АБН. Смещение правой ветви одной кривой относительно другой при одинаковой форме обеих кривых (рис. 81) указывает на погружение опорного горизонта к западу и востоку — направление падения

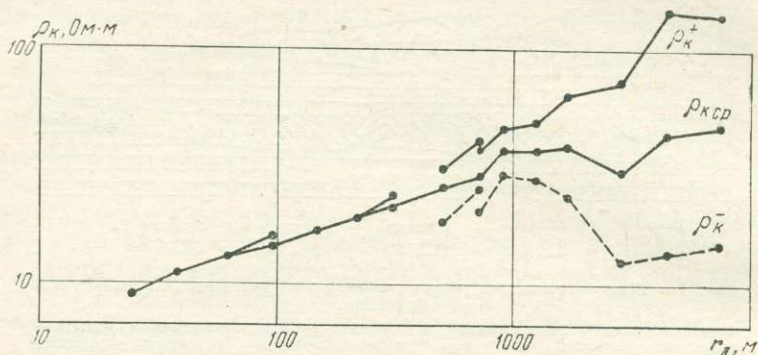


Рис. 80. Плюсовая, минусовая и средняя кривые двухстороннего ДЭЗ.

соответствует направлению перемещения того диполя MN , с которым получена кривая ρ_k , характеризующаяся смещением правой ветви в сторону больших значений r_d .

Разрезы кажущихся сопротивлений строят отдельно для плюсовых и минусовых кривых. Для этого на топографическом профиле

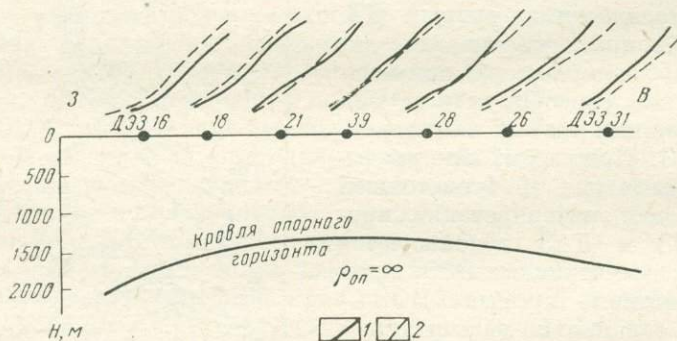


Рис. 81. Кривые двухсторонних ДЭЗ вдоль профиля над антиклинальной структурой.

Кривые: 1 — западные, 2 — восточные.

от точки центра ДЗ наносят по известным значениям r точки центров диполей MN , от которых откладывают вниз в логарифмическом масштабе величину r_d , соответствующую данному расстоянию. В результате точки записи ρ_k располагаются по наклонным линиям (рис. 82).

Строят также профили и карты приращений $\Delta\rho_k$, которые отражают расхождение плюсовых и минусовых кривых ДЭЗ, а тем самым — структуру поверхности опорного горизонта. Вели-

чины $\Delta\rho_k$ вычисляют как отношение разности значений ρ_k обеих кривых к их сумме при том действующем расстоянии r_d , на котором кривые ДЗ отражают поведение опорного горизонта:

$$\Delta\rho_k = (\rho_k^+ - \rho_k^-) / (\rho_k^+ + \rho_k^-).$$

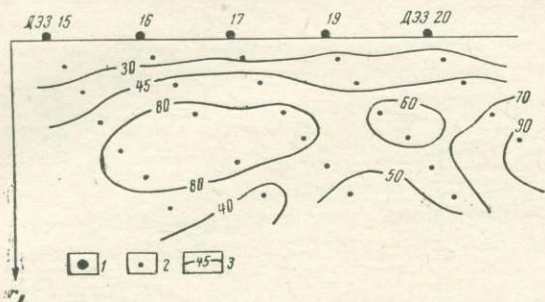


Рис. 82. Разрез кажущихся сопротивлений по данным двухсторонних ДЗЗ.

1 — центры ДЗЗ; 2 — точки записи ρ_k ; 3 — изоомы.

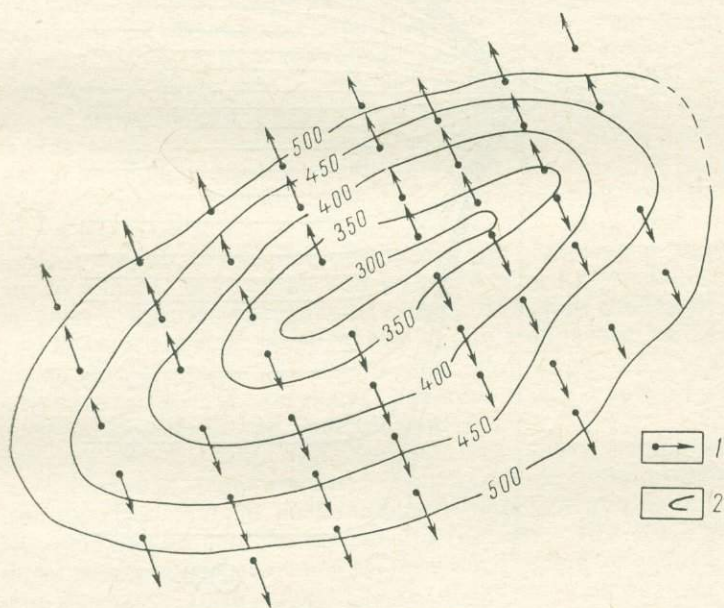


Рис. 83. Карта приращений $\Delta\rho_k$.

1 — приращения $\Delta\rho_k$; 2 — изогипсы кровли опорного горизонта.

Если опорный горизонт высокоомный, то полученные значения $\Delta\rho_k$ умножают на -1 , т. е. меняют знак на обратный.

Величины $\Delta\rho_k$ откладывают в виде стрелки в некотором масштабе от центра ДЗ вдоль его оси; при $\Delta\rho_k < 0$ стрелку направляют в сторону плюсовой кривой (плюсовых разносов), при $\Delta\rho_k > 0$ — в сторону

минусовой кривой. При такой ориентировке величин $\Delta\rho_k$ их направление соответствует погружению кровли опорного горизонта. Пример такой карты представлен на рис. 83.

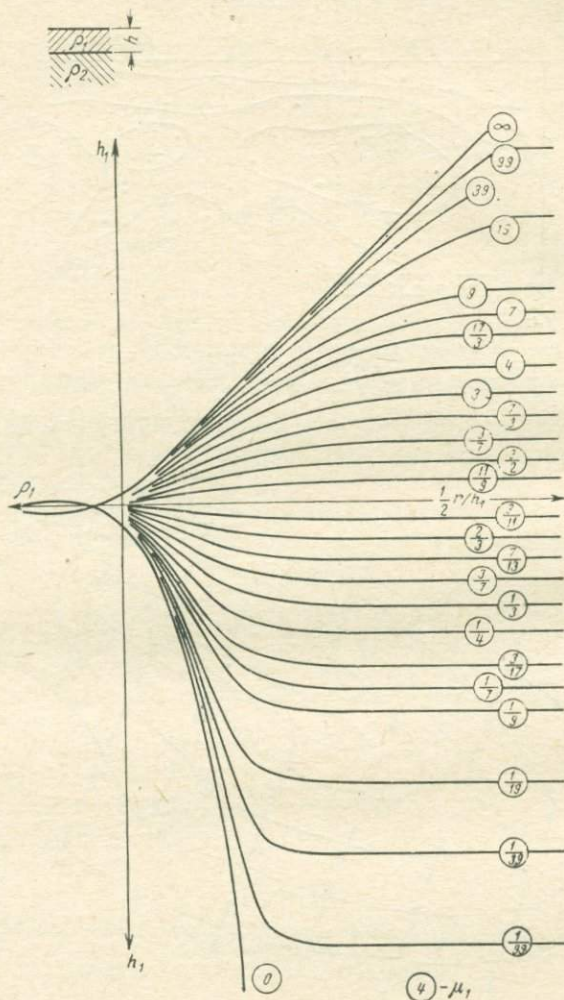


Рис. 84. Палетка двухслойных кривых ДОЗ.

Количественная интерпретация осредненных кривых двухсторонних ДЭЗ и ДАЗ проводится по палеткам, рассчитанным для установки АМНВ. Для интерпретации кривых ДОЗ служит альбом специальных палеток кривых осевых зондирований. Двухслойная палетка из этого альбома изображена на рис. 84. Приемы пользования этими палетками не отличаются от способов пользования палет-

ками ВЭЗ. Получаемые значения мощностей и глубин относят к центру ДЗ.

Плюсовые и минусовые кривые ДЗ можно интерпретировать по палеткам теоретических кривых, рассчитанных для горизонтально-слоистой среды лишь при углах наклона пластов, не превышающих 2—3°. При больших углах падения пластов плюсовые и минусовые кривые начинают все более резко отличаться одна от другой (а тем самым и от кривых для горизонтально-слоистой среды).

Получаемые при интерпретации двухсторонних кривых ДЗ значения глубин относят: при угле падения $\alpha < 5^\circ$ — к центру соответствующего зондирования (середине расстояния r), при $\alpha > 5^\circ$ — к точкам, отстоящим от центра питающего диполя на расстоянии $\frac{2}{3}r$ в направлении восстания пластов (по плюсовой кривой) и на расстоянии $\frac{1}{3}r$ в направлении падения пластов (по минусовой кривой).

§ 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД

При количественной интерпретации результатов вертикального электрического зондирования необходимо, как было показано выше, иметь сведения об удельном сопротивлении пород, слагающих промежуточные горизонты геоэлектрического разреза. Знание электрических свойств горных пород требуется также при интерпретации результатов наблюдений другими электроразведочными методами.

Удельное сопротивление горных пород может быть определено в их естественном залегании и на образцах в лабораторных условиях.

При проведении таких определений, которые принято называть параметрическими, следует иметь в виду, что практически породы и руды не бывают абсолютно однородными и в пределах даже одного пласта, интрузива или рудного тела их удельное сопротивление (как и другие физические и геологические свойства) может меняться, причем иногда значительно. Таким образом, те значения сопротивлений, которые мы используем для характеристики геоэлектрического разреза и слагающих его пород, фактически являются статистически осредненными величинами.

Вследствие этого при определении удельного сопротивления пород и руд нельзя ограничиваться единичными параметрическими измерениями. Для каждой разновидности пород и руд должно быть проведено как можно больше измерений (не менее 10—15). Полученные данные необходимо подвергнуть статистической обработке с вычислением средних (или модальных) величин измеряемых параметров. Для оценки достоверности и точности определений следует провести повторные измерения и вычислить среднеквадратичные ошибки. Эта статистическая обработка выполняется по известным правилам и формулам математической статистики.

Удельное сопротивление горных пород в естественном залегании определяется путем замеров на обнажениях и стенках горных выработок, параметрических зондирований и электрического каротажа скважин.

Замеры на обнажениях и в горных выработках. Если на естественном или искусственном обнажении какой-либо горной породы расположить четырехточечную установку АМNB, разности которой будут малы по сравнению с размерами обнажения, то кажущееся сопротивление, измеренное такой установкой, будет близко к истинному сопротивлению породы. При этом степень приближения будет тем больше, чем дальше от установки расположены другие породы, слагающие разрез данного участка, и чем меньше изменены породы на обнажении в результате процессов выветривания или операций, связанных с проходкой горных выработок.

Для производства параметрических измерений на обнажении выбирают относительно ровную площадку, а в случае необходимости — ее выравнивают и расчищают.

При измерениях в горных выработках установку размещают на одной из стенок выработки, причем во избежание влияния остальных стенок (при расчетах принимается, что наблюдения ведутся на плоской поверхности раздела горная порода — воздух) рекомендуется центр установки располагать в средней части стенки; разности питающих электродов должны быть не больше трети наименьшего линейного размера стенки (например, высоты выработки при работе на боковой стенке или ширины ее при работе на кровле).

Измерения проводят обычно симметричной установкой АМNB с разностями питающих электродов от первых десятков сантиметров до первых метров, а иногда установками АМN или АМ.

Для параметрических замеров используют железные или медные штыревые электроды диаметром 2—3 мм при длине заземленной части 1—2 см. Поляризация измерительных электродов при столь малых их размерах не представляет существенной помехи и легко компенсируется даже при железных электродах.

Схему установки несколько усложняют по сравнению с обычной установкой для измерения кажущегося сопротивления. Усложнения вызваны тем, что при использовании установок малых размеров приходится вести измерения при малой силе тока в цепи питающих заземлений, так как в противном случае разность потенциалов между приемными заземлениями превысила бы пределы, допускаемые измерительными приборами. Для уменьшения силы тока в питающую цепь включают добавочное сопротивление в несколько тысяч ом. Но измерение малых токов при помощи эталонных сопротивлений, имеющихся в приборах, затруднительно. Чтобы преодолеть это затруднение, приходится применять наружные эталонные сопротивления в несколько ом. Добавочное и эталонные сопротивления подбирают в процессе параметрических замеров такими, чтобы ΔU и I измерялись точнее.

Параметрические зондирования. Если провести зондирование около буровой скважины или шурфа, т. е. в точке с известным геологическим разрезом, то, определив при помощи альбома палеток по кривой зондирования S или T , можно вычислить, зная мощности

отдельных горизонтов, их удельное сопротивление, пользуясь следующими соотношениями:

$$\rho = h/S \quad \text{или} \quad \rho = T/h.$$

Такие зондирования, поставленные у скважин или шурфов с целью определения удельного сопротивления пород, называют параметрическими.

Для учета влияния азимута разноса на величину кажущегося сопротивления параметрические зондирования обычно выполняют как крестовые, т. е. в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Электрический каротаж скважин. Удельное сопротивление горных пород в скважине можно определить, опустив в скважину на какую-либо глубину обычную трех- или четырехточечную установку для измерения кажущегося сопротивления и измерив на поверхности земли ΔU и I .

При соответствующем подборе размеров установки влияние бурового раствора, заполняющего скважину, а также пластов, подстилающих и покрывающих изучаемый горизонт, может быть исключено и полученное кажущееся сопротивление будет достаточно близко к истинному сопротивлению изучаемых пород. Описанная операция является частью широкого цикла геофизических наблюдений в буровых скважинах и носит название каротажа кажущегося сопротивления.

Определение удельного сопротивления горных пород на образцах. Проводится обычно в лабораторных условиях. При отборе образцов необходимо стремиться к тому, чтобы они в возможно большей степени отражали типичное состояние породы (руды) в реальных условиях ее залегания. Для этого необходимо отбирать однородные образцы, не подвергшиеся процессам выветривания, разрушения или других вторичных изменений. Следует также сохранить природное состояние породы, в первую очередь, ее влажность и структуру. Для этого образцы, завернутые в марлю, парафинируют и предохраняют от механических воздействий при транспортировке в лабораторию.

Размер образца должен быть достаточно велик для того, чтобы мелкие неоднородные включения (галечки, желваки, прожилки и др.) заметным образом не сказывались на результатах измерений. Замеры следует стремиться проводить на возможно большем числе образцов, и затем строить по ним вариационные кривые.

Применяется несколько способов измерения удельного сопротивления на образцах. Из них наиболее простым является способ, основанный на применении четырехточечной установки.

На плоском участке поверхности образца располагают четырехточечную установку АМNB. Электроды изготовляют следующим образом: в нужных местах на поверхность образца наносят капли студня, изготовленного из агар-агара или желатины и сваренного на растворе медного купороса. В эти капли погружают концы

медных проводников, идущих к источнику тока и измерительным приборам. Диаметр каплей не должен превышать 0,1—0,2 расстояния между соседними электродами. Линейные размеры образца должны быть не меньше 2—3-кратного расстояния между электродами *A* и *B*.

В качестве прибора для измерения ΔU и I можно использовать автокомпенсатор или комплект ИКС.

По измеренным значениям ΔU и I определяют ρ_k :

$$\rho_k = K \Delta U / I.$$

Если размеры установки в 2—3 раза меньше линейных размеров образца, величина ρ_k оказывается близкой к истинному значению ρ .

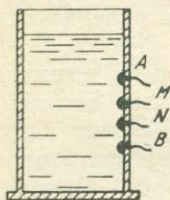


Рис. 85. Лабораторный резистивиметр.

Существенным недостатком всех лабораторных методов является, с одной стороны, невозможность полностью сохранить в образце его естественную влажность и структуру и, с другой, — ограниченность размеров образца, вследствие чего в лаборатории по существу определяется удельное сопротивление только лишь небольшого объема горной породы.

Определение удельного сопротивления природных растворов. Электрическая проводимость горных пород, как было показано выше, определяется в основном растворами, содержащимися в порах и трещинах, поэтому знание удельного сопротивления этих растворов представляет для электроразведчика несомненный интерес.

Для определения удельного сопротивления раствора в лабораторных условиях применяют лабораторные резистивиметры.

Лабораторный резистивиметр представляет собой сосуд из материала, не проводящего электрический ток, в стенки которого вмонтированы четыре электрода (рис. 85). Исследуемый раствор наливают в сосуд, затем через электроды *A* и *B* пропускают ток силой I и между электродами *M* и *N* измеряют разность потенциалов ΔU . Удельное сопротивление раствора вычисляют по формуле

$$\rho = K \Delta U / I.$$

Коэффициент K зависит от расстояния между электродами, их формы, а также формы стенок сосуда. Практически этот коэффициент находят путем градуировки резистивиметра раствором, удельное сопротивление ρ_0 которого известно заранее. В качестве калибровочного раствора обычно используют раствор поваренной соли известной концентрации.

Во избежание поляризации электродов измерения ΔU и I проводят на переменном токе. Для этого удобно применять аппаратуру ИКС.

§ 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЭЗ

Основные условия, определяющие возможность применения метода ВЭЗ, заключаются в следующем.

1. Породы, слагающие изучаемый разрез, должны различаться по удельному сопротивлению. Иными словами, геологические границы, интересующие исследователей, должны являться одновременно границами раздела пород с различным удельным сопротивлением. При поисках и разведке складчатых структур желательно, чтобы в разрезе изучаемой площади имелся опорный электрический горизонт.

2. Границы, отделяющие породы с различным удельным сопротивлением, должны иметь углы падения не выше $15-20^\circ$. При таких углах падения ошибки в определении мощностей при помощи палеток, рассчитанных для горизонтального залегания слоев, незначительны. При больших углах падения использование палеток для горизонтальных слоев недопустимо. Для дипольных установок этот предел понижается до $2-8^\circ$. Имеющийся же палеточный материал для наклонных слоев еще ограничен.

3. Рельеф дневной поверхности не должен быть пересеченным, так как палетки теоретических кривых рассчитаны в предположении, что поверхность раздела земля — воздух плоская. Неровности рельефа этой поверхности оказывают искажающее влияние на кривые ВЭЗ. Методика количественного учета влияния рельефа дневной поверхности до настоящего времени недостаточно разработана. Существуют лишь способы уменьшения этого влияния. Таким способом является правильный выбор направления разносов установки. Так, если зондирование выполняется в долине, то борта долины меньше всего влияют на результаты зондирования в случае, когда разносы направлены вдоль ее оси. При зондировании на хребте разносы следует направлять также вдоль хребта.

4. Число электрических горизонтов в разрезе не должно превышать пяти-шести. В противном случае количественная интерпретация кривых ВЭЗ весьма усложняется и становится ненадежной.

5. Глубинность метода ВЭЗ ограничивается первыми километрами. Изучение разрезов на большую глубину затруднительно, так как в этом случае приходится увеличивать разносы питающих электродов до нескольких десятков километров. Однако на таких расстояниях горизонты, слагающие геологический разрез, вследствие изменения фациального состава меняют свое сопротивление. Это обуславливает искажение формы кривых ВЭЗ, причем искажения не поддаются количественному учету. Меняется сопротивление пород и за счет глубинных факторов. К тому же с увеличением глубины исследования возрастает многослойность кривых. Разработка методики выполнения и интерпретации глубинных ВЭЗ — одна из перспективных задач электроразведки.

Метод ВЭЗ применяется при региональных структурных исследованиях. При этом более благоприятными для постановки метода ВЭЗ являются пологие платформенные структуры.

В областях мощного осадконакопления (в предгорных и межгорных впадинах) структуры имеют более крутые углы падения на крыльях, что затрудняет применение метода ВЭЗ.

Структурная карта, построенная по данным ВЭЗ по кровле высокоомного опорного электрического горизонта, представленного известняками карбона, изображена на рис. 79.

Горизонты гипсов и ангидритов, если они залегают в верхних частях разреза и не участвуют в строении изучаемой структуры, экранируют электрическое поле, не пропускают электрический ток на большую глубину и, таким образом, делают невозможным использование метода ВЭЗ для изучения глубинных структур. С такой обстановкой можно встретиться в восточных районах Русской платформы. В таких случаях применяют другие методы глубинной электроразведки — магнитотеллурическое зондирование МТЗ, частотное зондирование ЧЗ, зондирование становлением поля ЗС.

Другая задача, решаемая методом вертикальных зондирований — картирование рельефа метаморфических и изверженных пород складчатого основания платформы, перекрытых более молодыми, слабо дислоцированными и относительно хорошо проводящими породами. Решение этой задачи возможно главным образом на тех участках платформы, в пределах которых складчатое основание залегает на глубине, не превышающей первых сотен метров.

При поисках и разведке месторождений каменного угля метод ВЭЗ находит применение как один из способов изучения структуры каменноугольных бассейнов. Поскольку угленосные свиты представлены в основном песчано-глинистыми образованиями, отличающимися пониженным сопротивлением, метод ВЭЗ может быть использован для изучения рельефа пород, служащих ложем угленосной свиты. Иногда метод ВЭЗ используют с целью определения мощности пород, залегающих над угленосной свитой. Это удается в тех случаях, когда сопротивление покрывающих пород в достаточной степени отличается от сопротивления угленосных пород.

Геоэлектрический разрез по кровле угленосных отложений карбона, построенный по данным вертикальных зондирований для одного из участков Подмосковского бассейна, приведен на рис. 78.

Метод ВЭЗ применяют и при изучении погребенных и современных речных долин в связи с поисками россыпных месторождений. Основной предпосылкой для использования в данном случае метода ВЭЗ является то, что породы коренного ложа долины обычно отличаются от рыхлой и соответственно этому низкоомной толщи аллювиально-делювиальных отложений повышенным сопротивлением. При помощи ВЭЗ изучают рельеф коренных пород, а также расчлениют рыхлые отложения.

Затрудняет интерпретацию кривых ВЭЗ при изучении погребенных речных долин наличие древней коры выветривания коренных пород. Удельное сопротивление пород коры выветривания обычно занимает промежуточное положение между удельным сопротивлением рыхлых и коренных отложений и меняется с глубиной по мере

изменения степени выветрелости пород. При наличии этого горизонта резко снижается точность интерпретации.

Метод ВЭЗ используется и при геологическом картировании, особенно в закрытых районах. В условиях платформ и предгорных прогибов он применяется при изучении тектонического строения осадочных отложений; в районах же со сложной тектоникой при помощи зондирования можно решать только отдельные, более частные задачи — определять мощность четвертичных отложений, изучать глубину залегания и рельеф коренных пород и т. п. Наличие мощных отложений древней коры выветривания, как это наблюдается, например, в Центральном Казахстане, также существенно затрудняет интерпретацию кривых ВЭЗ.

Метод ВЭЗ применяют для изучения внутреннего строения отдельных крупных структур, таких как, например, мезозойские депрессии Забайкалья, для прослеживания подземных продолжений отдельных интрузий (при пологом залегании их кровли) и т. п. Используется метод и при поисках рудных месторождений. Так, например, посредством вертикальных разрезов кажущегося сопротивления, построенных по данным ВЭЗ, удается выявлять зоны, перспективные для обнаружения медноколчеданных и полиметаллических руд на Южном Урале, Забайкалье, при условии, если рудные тела приурочены к достаточно мощным и относительно однородным комплексам вмещающих пород. Рудные тела на таких разрезах при достаточно больших их размерах выделяются локальными зонами пониженных сопротивлений.

При поисках месторождений бокситов методом ВЭЗ картируются зоны с повышенной мощностью погребенной коры выветривания, с которыми генетически могут быть связаны промышленные скопления бокситовых руд.

При инженерно-геологических исследованиях метод ВЭЗ применяют как дешевый и быстрый способ картирования рельефа пород, служащих основанием для инженерных сооружений. В связи с большой детальностью инженерно-геологических исследований точки ВЭЗ обычно располагают по сгущенной сети, однако не имеет смысла расстояние между этими точками брать меньше средней глубины до опорного горизонта на исследуемой площади.

Изучение оснований под инженерные сооружения может проводиться также на площадях, занятых поверхностными водоемами (в руслах рек, на озерах и в прибрежной части морей). В этом случае электроды помещают на поверхности водоема, а слой воды рассматривают как добавочный электрический горизонт. Эти работы удобно проводить зимой со льда, прорубая для электродов лунки во льду.

Попутно с картированием рельефа коренных пород при помощи метода ВЭЗ изучают трещиноватость и закарстованность пород. Здесь широко применяется методика круговых зондирований.

Метод ВЭЗ может быть также использован и при изучении оползней для картирования зеркал скольжения и для определения мощности смещенных масс.

Существенную помощь метод ВЭЗ может оказать гидрогеологам, занимающимся поисками водоносных структур. В том случае, когда в составе пород, слагающих изучаемый район, имеется опорный электрический горизонт, структурные карты, построенные по данным зондирований, позволяют определить положение благоприятных для водонакопления структур. В ряде случаев удастся непосредственно выделить и оконтурить по площади водоносные горизонты, так как увеличение содержания песчаной фракции в породе ведет к увеличению ее удельного сопротивления. Изучая при помощи метода ВЭЗ геоэлектрический разрез, можно выделить в его пределах горизонты с повышенным удельным сопротивлением и тем самым выявить пласты-коллекторы подземных вод.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

§ 1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Особенностью электрического профилирования (сокращенно электропрофилирования) является то, что при этом способе изучения кажущегося удельного сопротивления размеры установки, т. е. взаимное положение питающих и измерительных заземлений, остаются неизменными, в то время как вся установка от замера к замеру перемещается вдоль некоторого направления, называемого электропрофилем. Это позволяет изучать геологический разрез вдоль линий наблюдений.

В качестве примера, иллюстрирующего сущность метода, рассмотрим электропрофилирование вдоль линии, проходящей над антиклинальным поднятием каких-либо высокоомных пород, перекрытых хорошо проводящими отложениями. На рис. 86 цифрами *I*, *II* и *III* обозначены три последовательных положения четырехточечной установки АМNB. Положение *I* характерно тем, что установка расположена далеко от поверхности раздела пород с сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 и, следовательно, эта граница мало сказывается на распределении тока, введенного в землю через заземления *A* и *B*. Это распределение будет близко к распределению тока в однородной среде с сопротивлением ρ_1 . Поскольку в однородной среде с удельным сопротивлением ρ $\rho_k = \rho$, для положения *I* можно написать, что $\rho_k \rightarrow \rho_1$.

Перемещение установки по профилю из положения *I* в положение *II* равносильно приближению ее к рассматриваемой поверхности раздела и, следовательно, к зоне увеличения влияния этой границы на распределение тока. Это влияние проявляется в том, что плохо проводящие подстилающие породы вытесняют ток в верхний, более проводящий слой. Возрастание плотности тока в верхнем слое ведет к увеличению разности потенциалов между приемными электродами и, следовательно, к увеличению кажущегося сопротивления. Максимального значения ρ_k достигнет в положении *II* над осевой частью

поднятия. По мере удаления установки от осевой части антиклинали ρ_k будет уменьшаться и в положении III снова будет близко по величине к ρ_1 . На рис. 86 изображен также график зависимости ρ_k от положения установки на профиле.

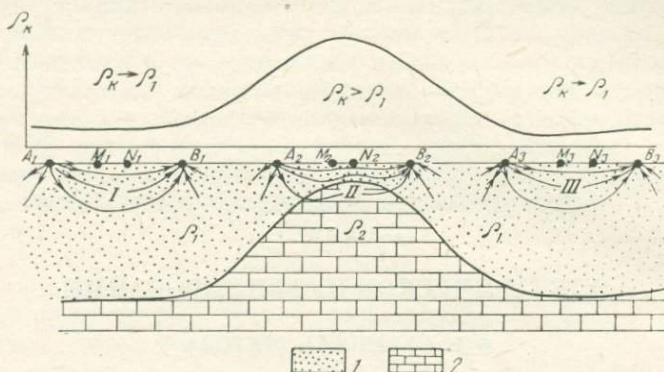


Рис. 86. Электрическое профилирование над антиклинальным поднятием высокоомных пород.

1 — низкоомные породы с сопротивлением ρ_1 ; 2 — высокоомные породы с сопротивлением ρ_2 .

Аналогичным способом можно показать, что, когда ядро антиклинального поднятия сложено хорошо проводящими породами, над осевой частью антиклинали наблюдается минимум кажущегося сопротивления.

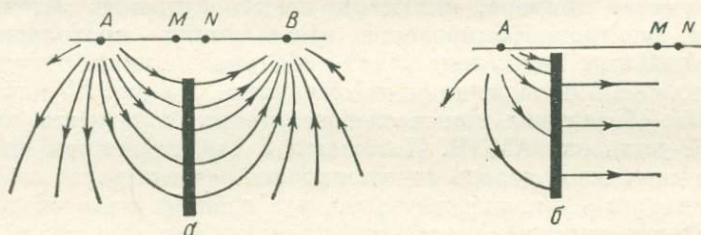


Рис. 87. Хорошо проводящее тело в поле точечных заземлений.

а — крутопадающее хорошо проводящее тело в поле двух точечных заземлений; б — экранирующее влияние крутопадающего тела.

Указанными выше особенностями изменения ρ_k над антиклиналью определяется возможность применения электропрофилирования для картирования этой структуры без дорогостоящих горных работ.

Характер связи между кажущимся удельным сопротивлением и строением геологического разреза зависит также от типа применяемой установки. Так, например, крутопадающее хорошо проводящее тело (рудная жила, пласт антрацита и т. п.), расположенное в экваториальной плоскости установки АВ, мало искажает поле заземлений А и В (рис. 87, а). Это объясняется тем, что у границы между хорошо проводящим телом и вмещающими породами вектор плот-

ности тока перпендикулярен к этой границе. Однако если мы обратимся к рис. 9, на котором изображены токовые линии двух точечных источников в однородной среде, то увидим, что и в этом случае токовые линии перпендикулярны к экваториальной плоскости установки АВ. Следовательно, хорошо проводящее тело существенно не исказит электрическое поле источников А и В в центральной части отрезка АВ, и поэтому на графиках ρ_k для симметричной установки крутопадающие хорошо проводящие тела отразятся недостаточно четко. С другой стороны, хорошо проводящие тела, расположенные вблизи питающего заземления трехточечной установки АМN (рис. 87, б), служат экраном для электрического тока и существенно искажают значение ρ_k , измеряемого такой установкой. Таким образом, мы приходим к выводу, что симметричная установка малоэффективна для выявления крутопадающих хорошо проводящих образований и, наоборот, установка АМN в этом случае дает более четкие результаты.

Данный пример показывает, что в различных геологических условиях для получения наиболее четких результатов надо применять различные установки. Этим объясняется существование разнообразных модификаций электропрофилирования, различающихся типом установок и способами их перемещения по профилю.

Электрическое профилирование может носить характер маршрутной или площадной съемки. При маршрутной съемке точки наблюдения располагают вдоль отдельных направлений (электропрофилей), пересекающих исследуемую площадь в наиболее интересных или характерных направлениях, обычно вкрест простирания пород.

При площадной съемке исследуемый участок покрывают равномерной сетью точек наблюдения. Форма и густота сети определяются формой и размерами объектов исследования. Если изучаемые геологические структуры или геологические тела (например, рудные тела) имеют изомерную форму, применяют квадратную сеть, характеризующуюся тем, что расстояние между точками наблюдения по профилю равно расстоянию между соседними профилями. При изучении геологических структур, вытянутых в каком-либо направлении, наблюдения проводят по прямоугольной сети, при которой расстояние между профилями больше, чем расстояние между точками наблюдения по профилю. Профили располагают вкрест простирания структур.

Расстояние между точками наблюдения по профилю — шаг наблюдений — должно быть таким, чтобы на графиках ρ_k достаточно детально выделялись максимумы, минимумы и точки перегибов кривых. Обычно это расстояние выбирают опытным путем на профилях с известным геологическим разрезом.

Расстояние между профилями определяется масштабом отчетной карты. В районах с простым геологическим строением расстояние между профилями на карте не должно превышать 4 см. В районах со сложным геологическим строением это расстояние должно быть не более 1—2 см.

§ 2. ПРОФИЛИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОЙ УСТАНОВКОЙ АМNB

В симметричной четырехточечной установке АМNB все четыре заземления находятся на одной прямой, причем приемные заземления M и N расположены симметрично центру отрезка между питающими заземлениями (см. рис. 25, а).

Симметричная установка применяется для изучения сравнительно простых в электрическом отношении геологических структур при условии относительного постоянства сопротивления покровных отложений. Наиболее характерные задачи, решаемые при помощи симметричной установки, следующие:

а) картирование складчатых структур, сложенных однородными в электрическом отношении породами и имеющих в своем составе опорные электрические горизонты;

б) картирование крутопадающих контактов различных по удельному сопротивлению пород — осадочных и изверженных, осадочных и метаморфических и т. п.;

в) картирование крутопадающих плохо проводящих геологических образований — даек, кварцевых жил, пластов угля и т. п.

Существенной предпосылкой, обеспечивающей эффективность электропрофилирования, является правильный выбор размеров установки. Он может быть осуществлен двумя способами. Первый из них заключается в том, что на исследуемой площади выбирают профиль с известным геологическим строением (например, линию буровых скважин) и вдоль этого профиля проводят наблюдения с установками различного размера. Сопоставляя затем графики ρ_k с геологическим разрезом, выбирают ту установку, которая наиболее эффективно позволяет решить поставленную геологическую задачу. Этот способ хорош своей простотой и убедительностью, однако он доступен только при наличии подходящего участка для опытных работ.

Второй способ выбора размеров установки основан на использовании данных вертикальных электрических зондирований. Для того чтобы уяснить этот способ, обратимся к следующему примеру. Пусть на исследуемой площади методом электропрофилирования следует провести картирование сброса, перекрытого поверхностными отложениями (рис. 88). Для выбора разносов питающих заземлений в точках O_1 и O_2 , расположенных на различных крыльях сброса, выполняются вертикальные зондирования. Сравнивая кривые этих зондирований, можно видеть, что разнос питающих заземлений, равный, например, 8 м, явно непригоден для решения поставленной задачи, так как в этом случае по обе стороны от сброса величины ρ_k практически не различаются и близки к значению удельного сопротивления перекрывающих сброс пород. С другой стороны, при разnose 800 м ρ_k близко к удельному сопротивлению коренных пород, в которых отмечен сброс. Очевидно, что в рассматриваемом случае наилучшие результаты можно получить при профилировании установкой с разносом AB , равным 40—80 м, так как при этом разnose

разница в значениях ρ_K по обе стороны от сброса будет достаточно велика, чтобы сброс хорошо отметился на графиках электропрофилеирования и карте изоом.

При выборе разносов следует учитывать, что экономически выгоднее работать с установками, имеющими малые разносы.

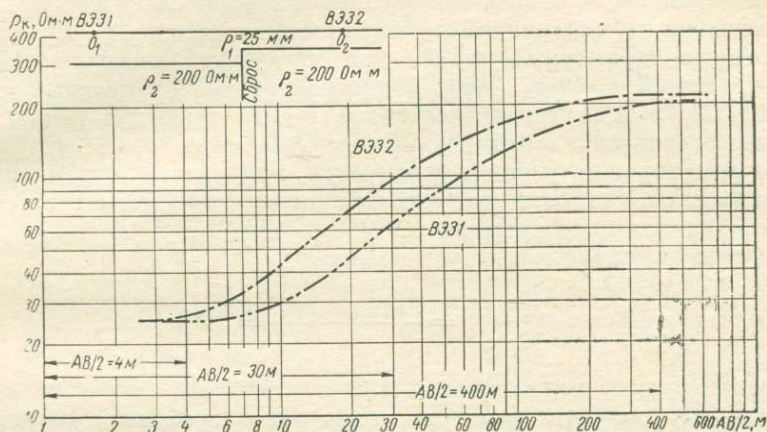


Рис. 88. Выбор разносов AB для профилирования при помощи кривых ВЭЗ.

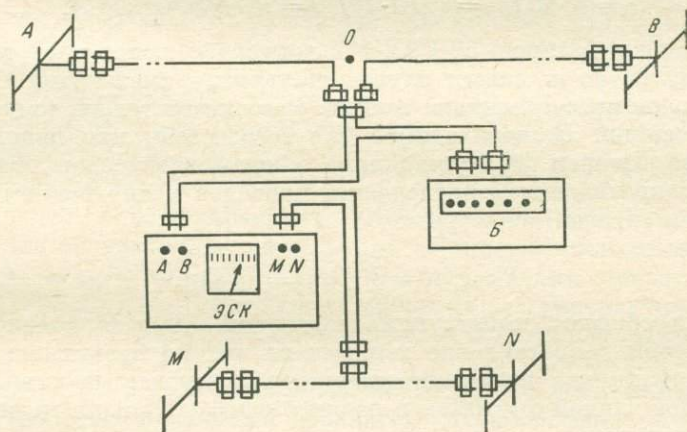


Рис. 89. Монтажная схема симметричной четырехточечной установки $AMNB$ с ЭСК.

Монтаж установки. Монтажная схема симметричной четырехточечной установки $AMNB$, в которой в качестве измерительного прибора применен автокомпенсатор ЭСК, изображена на рис. 89. Для питающих и приемных линий установки применяют провода марки ГПСМП, ГПСМПО или другой подходящей марки. В зависимости от требуемого напряжения и силы тока в качестве источника тока используют батареи 69-ГРМЦ-6 или 29-ГРМЦ-13; для заземлений

питающей цепи применяют железные стержни, а для заземления приемной цепи — медные стержни. Конструкция заземлений, а также число батарей зависят от сопротивления поверхностных отложений, размеров установки и от величины кажущегося сопротивления и могут быть рассчитаны для конкретных условий работы в том или ином районе, если задаться вероятными значениями кажущегося сопротивления и измеряемой разности потенциалов.

Проведем примерный расчет для установки, имеющей $AB = 400$ м и $MN = 40$ м. Пусть сопротивление поверхностных отложений $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, а геологический разрез по профилю таков, что кажущиеся сопротивления должны быть не менее $40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Чтобы обеспечить хорошие условия измерений, при расчете будем ориентироваться на разности потенциалов между приемными заземлениями, составляющие примерно 10 мВ .

Подсчитаем коэффициент установки:

$$K = \pi \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} = \frac{3,14 \cdot 220 \cdot 180}{40} = 3110 \text{ м.}$$

Воспользуемся выражением (III.3) и определим силу тока, необходимую для создания разности потенциалов требуемой величины. Находим, что

$$I = K \Delta U / \rho_k = 3110 \cdot 40 / 40 = 777 \text{ мА} \approx 0,78 \text{ А.}$$

Поскольку батарея 69-ГРМЦ-6 допускает разрядные токи не выше $0,5 \text{ А}$, то в нашем случае достаточно иметь одну батарею с параллельным соединением секций. Рассчитаем теперь сопротивление заземлений R , необходимое для того, чтобы при напряжении питающей батареи 36 В сила тока в цепи электродов равнялась $0,78 \text{ А}$ (сопротивлением подводящих проводов и внутренним сопротивлением батареи пренебрегаем).

Очевидно, что

$$R = U / I = 36 / 0,78 = 46 \text{ Ом.}$$

Таким образом, конструкция заземлений A и B должна быть такой, чтобы сопротивление каждого из них не превышало 23 Ом . Предположим, что питающие заземления устроены из стержневых электродов длиной $a = 0,5 \text{ м}$ и радиусом $b = 0,01 \text{ м}$. Сопротивление такого электрода

$$R_s = 0,367 \frac{\rho}{a} \lg \frac{2a}{b} \approx 147 \text{ Ом.}$$

Чтобы сопротивление питающих заземлений не превышало 23 Ом , их, очевидно, следует устраивать из семи параллельно соединенных электродов, удаленных один от другого для исключения взаимного влияния на расстоянии около 1 м .

Полевые работы. При проведении работ с симметричной установкой $AMNB$ соблюдают следующие правила: потенциометр или автокомпенсатор устанавливают на расстоянии $1,0\text{--}1,5 \text{ м}$ от центра

установки таким образом, чтобы оператор в рабочем положении находился лицом к проводам; батареи ставят на резиновый коврик справа от потенциометра панелями к прибору; вычислитель должен находиться справа от оператора, чтобы оператор мог видеть запись в полевом журнале; рабочий на центре установки находится на противоположной от прибора стороне проводов.

Обычно профилирование проводов вдоль заранее провешенных и размеченных пикетами линий — профилей. В этом случае расстояние между питающими и приемными заземлениями, а также положение центра установки устанавливают по пикетам и разметки проводов не требуется. Иногда направление электропрофилей на местности определяют буссолью или по местным ориентирам, а мерной лентой служат провода питающей или приемной линий, на которые для этой цели наносят соответствующие метки.

Полевые операции на профиле выполняют в следующем порядке. После того как центр установки совмещен с пикетом профиля, забиты и подключены все электроды, оператор измеряет ΔU и I , а вычислитель подсчитывает значение ρ_k . Затем оператор подает команду к переходу на следующую точку, предварительно отключив все соединительные провода у прибора, освободив, таким образом, приемную и питающую линии, а также батареи для их переноса. Рабочие выдергивают заземления и отключают их от линий. Затем рабочие на передних по ходу питающем и приемном заземлениях перетаскивают провода на расстояние, равное шагу профилирования, причем рабочий на центре следит за тем, чтобы центр установки оказался на соответствующем пикете профиля; оператор переносит на новую точку прибор, а рабочие — батареи. Закончив переход, рабочие забивают питающие и приемные электроды, подключают их к линиям; оператор подключает к линии батареи прибор и проводит замер на новой точке.

В процессе профилирования оператор выполняет контрольные замеры для обнаружения утечек одним из описанных выше способов. Сходимость значений ρ_k при основном и контрольном замерах должна быть в пределах 5%. В противном случае на следующую точку переходят только после устранения причины, вызвавшей расхождение замеров.

При работе с небольшими установками ($AB < 1$ км) контрольные замеры проводят на каждой двадцатой точке профиля, а в сырую погоду — на каждой десятой точке. Контрольные замеры следует выполнять также на точках, в которых резко изменяется ход графика ρ_k . При разносах больше 1 км контрольные замеры необходимо проводить на каждой точке.

Провода установок с разносами питающих заземлений до 500—1000 м перетаскивают вручную, для чего их удобно связывать на центре в одну линию. При профилировании с большими установками, если позволяют условия местности, применяют автомашины.

Для удобства перехода с точки на точку разносы питающей и приемной линий выбирают такими, чтобы расстояния между питающими

и приемными заземлениями равнялись или были кратными шагу наблюдений.

На рис. 90 в качестве примера приведена схема перемещения по профилю симметричной установки AMNB с $MN = 1/7 AB$ и шагом профилирования, равным MN .

Данные полевых измерений записывают в журнал следующей формы.

Журнал для записи наблюдений методом электропрофилеирования с установкой AMNB

Участок . . .	Профиль . . .	Азимут . . .	Дата
AB	MN	Шаг	Начало наблюдений
K	Батареи		Конец наблюдений
			Погода

№ точки (пикета)	ΔU , мВ	I , сА	ρ_k , Ом·м	Примечание

Оператор Вычислитель Проверил

В графе «Примечание» вычислитель отмечает результаты глазомерной съемки рельефа местности вдоль профиля, указывает выходы коренных горных пород в естественных обнажениях или горных выработках, характер поверхностных отложений и т. п. Журнал

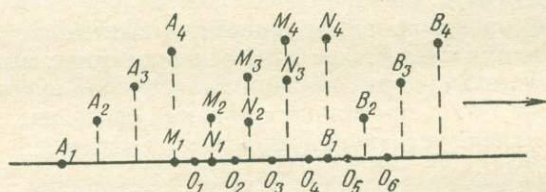


Рис. 90. Схема перемещения по профилю установки AMNB с $MN = 1/7 AB$ и шагом, равным MN .

должен быть подписан оператором и вычислителем, а после его проверки — проверяющим лицом.

Для оценки точности полевых работ проводят повторные измерения по отдельным, равномерно распределенным по исследуемой площадке (и по времени съемки) профилям. Согласно действующей инструкции объем контрольных измерений должен составлять не менее 5% их общего объема. При тяжелых условиях исследований число контрольных замеров увеличивается. Точность измерений

характеризуется относительной погрешностью определения ρ_k , вычисляемой по следующей формуле:

$$P = \frac{\rho_k^{(1)} - \rho_k^{(2)}}{\frac{\rho_k^{(1)} + \rho_k^{(2)}}{2}} \cdot 100\%,$$

где ρ_k^1 и ρ_k^2 — значения ρ_k , полученные при основном и контрольном измерениях.

Величина относительной погрешности при нормальных условиях измерений не должна превышать 5%.

Изображение результатов. Результаты электропрофилеирования с установкой АМНВ изображают в виде графиков ρ_k , а при площадной съемке — в виде карт графиков ρ_k и карт линий равных значений кажущегося удельного сопротивления.

На графиках ρ_k по оси абсцисс откладывают положение центра установки, а по оси ординат — значение ρ_k , полученное при данном положении этого центра. Нанесенные таким образом точки соединяют прямыми линиями. Горизонтальный масштаб для графиков обычно принимают равным масштабу отчетных карт, а вертикальный масштаб выбирают, руководствуясь наглядностью графика. Если значение ρ_k на профиле меняется в широких пределах, по оси ординат целесообразно откладывать не ρ_k , а его логарифмы, т. е. применять полулогарифмическую сетку.

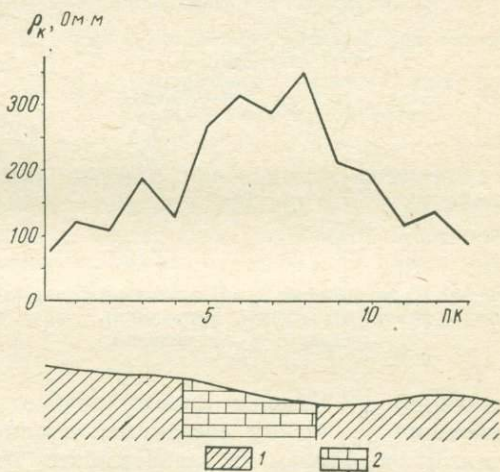


Рис. 91. График ρ_k по данным профилирования установкой АМНВ ($AB = 100$ м, $MN = 20$ м).
1 — сланцы; 2 — известняки.

Под графиком ρ_k обычно изображают профиль дневной поверхности, что позволяет качественно учесть искажающее влияние рельефа местности на значение ρ_k . На графике должен быть указан район работ, а также в масштабе изображена та установка, с которой получен график. Пример оформления графиков ρ_k приведен на рис. 91. После интерпретации на график ρ_k наносят геологический разрез вдоль профиля.

При площадной съемке графики ρ_k по отдельным профилям изображают на общем плане. Линии профилей служат осями абсцисс. Вертикальный масштаб выбирают таким, чтобы графики соседних профилей по возможности не пересекались. На полученную таким образом карту графиков ρ_k наносят основные элементы ситуации и данные интерпретации, как показано на рис. 92.

Карту линий равных значений ρ_k (сокращенно — карту изоом) строят следующим образом. На план наносят сеть наблюдений и около каждой точки пишут величину ρ_k , измеренную на этой точке; в полученном таким образом поле чисел проводят изоомы — линии равных

значений ρ_k ; в полученном таким образом поле чисел проводят изоомы — линии равных

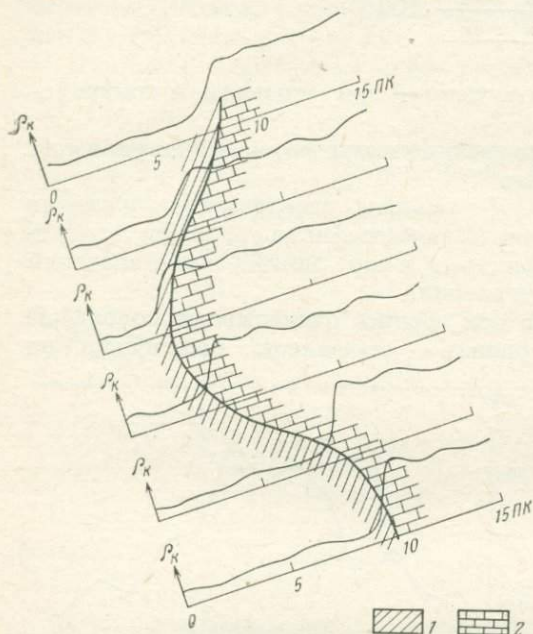


Рис. 92. Карта графиков ρ_k по данным профилирования ($AB = 200$ м, $MN = 40$ м).
1 — сланцы; 2 — известняки.

значений ρ_k . Сечение изоом (разность значений ρ_k между соседними изолиниями) выбирают в зависимости от характера изменения величин в пределах площади съемки и в соответствии с точностью определений ρ_k . Иногда для большей наглядности зоны с одинаковым значением ρ_k выделяют штриховкой или закрашивают. На карту также наносят основные элементы ситуации и данные последующей интерпретации материалов электроразведки. Карта изоом над антиклинальным поднятием изображена на рис. 93.

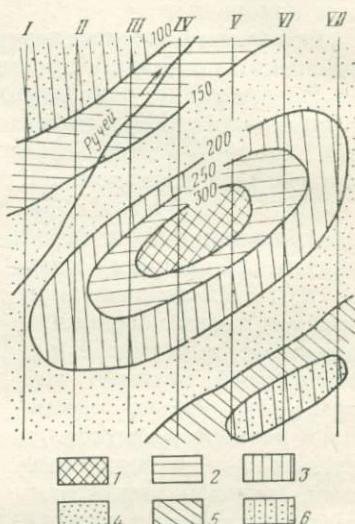


Рис. 93. Карта изоом над антиклинальным поднятием, в ядре которого залегают породы высокого сопротивления ($AB = 200$ м, $MN = 40$ м).

1 — $\rho_k > 300$ Ом·м; 2 — $\rho_k = 300 \div 250$ Ом·м; 3 — $\rho_k = 250 \div 200$ Ом·м; 4 — $\rho_k = 200 \div 150$ Ом·м; 5 — $\rho_k = 150 \div 100$ Ом·м; 6 — $\rho_k = 100 \div 50$ Ом·м; I—VII — профили.

§ 3. ПРОФИЛИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОЙ УСТАНОВКОЙ AA'MNB'В С ДВОЙНЫМИ РАЗНОСАМИ

Симметричная установка с двойными разносами отличается от установки AMNB наличием второй пары питающих заземлений A' и B' , расположенных также симметрично относительно центра от-

резка AB , причем разнос AB больше разнosa $A'B'$ (рис. 94, а). Таким образом, установка $AA'MNB'B$ совмещает две четырехточечные установки $AMNB$ и $A'MNB'$, имеющие одинаковый разнос приемных заземлений.

Наличие второй пары заземлений позволяет проводить на каждой точке два замера ρ_k установкой различных размеров и получать одновременно два графика ρ_k вдоль профиля. Поскольку с изменением разнosa питающих заземлений меняется глубина проникновения тока в землю, два замера ρ_k в одной точке, как и два графика ρ_k вдоль профиля, характеризуют геологический разрез в пределах разных глубин. Установка с двойными разнosaми дает возможность более достоверно и однозначно по сравнению с установкой $AMNB$ интерпретировать результаты электропрофилеирования.

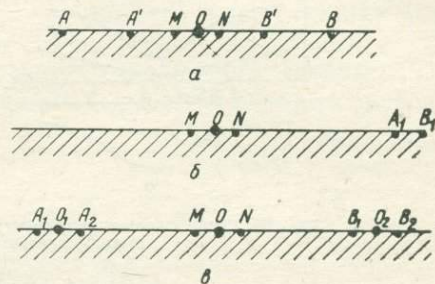


Рис. 94. Различные установки для электропрофилеирования.

а — симметричная с двойными разнosaми;
б — односторонняя дипольно-осевая; в —
двухсторонняя дипольно-осевая

На рис. 95 изображены два разреза: на одном — синклинали, сложенная хорошо проводящими породами, на другом — антиклиналь с низкоомными породами в ядре. Над разрезами помещены графики электропрофилеирования установкой $AMNB$. В обоих случаях графики носят качественно одинаковый характер — над синклиналию и антиклиналю кривые ρ_k имеют минимум. Вследствие

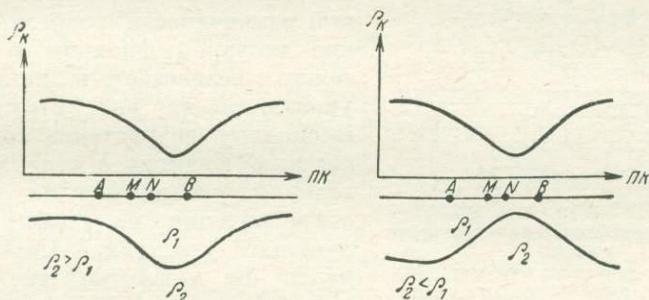


Рис. 95. Графики электропрофилеирования установкой $AMNB$ над синклиналию и антиклиналю.

этого при решении обратной задачи мы встретимся с неоднозначностью решения, т. е. не сумеем ответить на вопрос, какой геологической структуре отвечают полученные графики.

Если над теми же разрезами провести профилеирование установкой с двойными разнosaми, то над синклиналию при данном соотношении сопротивлений график ρ_k для малого разнosa расположится ниже

графика ρ_k для большого разноса; над антиклиналью соотношение кажущихся сопротивлений для обоих разносов будет обратным (рис. 96). Отсюда следует, что применение установки с двойными

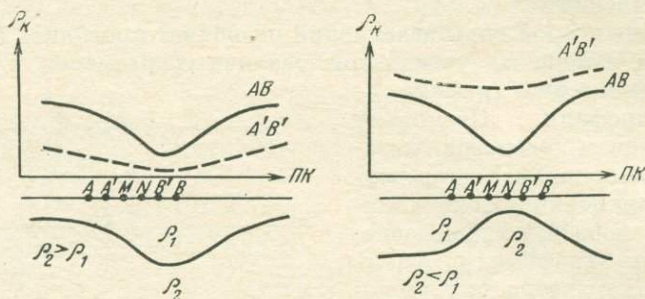


Рис. 96. Графики электропрофилирования установкой AA'MNB'B над синклиналью и антиклиналью.

разносами в данном случае позволяет исключить неоднозначность решения обратной задачи.

Рассмотрим случай, когда в результате фациального изменения пород на исследуемой площади искажаются и трудно истолковываются результаты профилирования установкой AMNB.

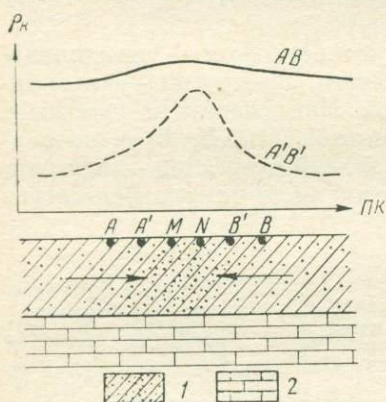


Рис. 97. Графики ρ_k для установки AA'MNB'B над фациально меняющейся толщей.

1 — песчано-глинистая толща; 2 — известняки.

Пусть в геологическом строении исследуемой площади участвуют две горизонтально залегающие толщи: верхняя, представленная песчано-глинистыми образованиями, и нижняя, сложенная известняками. Вследствие фациальной изменчивости разреза содержание песчаной фракции в верхней толще возрастает в направлении, указанном на рис. 97 стрелками. Поскольку возрастание содержания песчаной фракции в породах обычно ведет к увеличению их удельного сопротивления, на графике ρ_k , полученном установкой AMNB, наблюдался бы максимум над участком с повышенным содержанием песка в верхней толще. Не зная указанной особенности разреза, этот максимум можно было бы объяснить наличием антиклинального поднятия в высокоомных известняках.

Применение установки AA'MNB'B позволяет в данном случае избежать этой ошибки.

На рис. 97 изображены графики ρ_k для двойной установки. При малых разносах рост сопротивления верхнего горизонта вызывает резкое увеличение ρ_k ; при больших разносах он существенно не

сказывается на значениях ρ_k . Следовательно, проявление аномалии ρ_k только на малом разnose указывает на связь ее с особенностями строения верхней части разреза, а не с антиклинальным поднятием в глубоких горизонтах.

Область применения установки с двойными разносами распространена в общем на те же объекты, которые перечислялись выше для установки АМNB; однако ограничивающие условия, касающиеся относительной простоты структур, постоянства сопротивлений перекрывающих отложений, в данном случае менее существенны.

Монтаж установки. Монтажная схема установки с двойными разносами изображена на рис. 98. Для уменьшения количества проводов

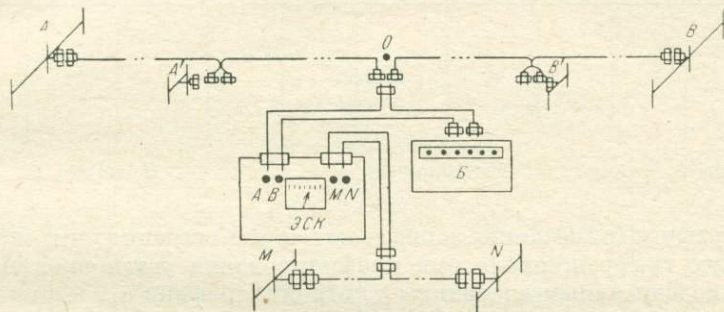


Рис. 98. Монтажная схема установки АА'МNB'В с ЭСК.

и упрощения работы на профиле питающая линия АВ по обе стороны от центра на расстояниях, равных разносам OA' и OB' , разрезана и снабжена вилками для подключения заземлений A' и B' . Переключения питающей линии на большой или малый разнос производят рабочие, обслуживающие заземления A' и B' . При выборе величины разноса питающих заземлений прежде всего следует определить задачи, которые должны быть решены при помощи каждого из разносов установки (например, график ρ_k на большом разносе должен отразить погребенный рельеф коренных пород, а график ρ_k на малом разносе — особенности литологии покровных отложений). Для удобства перехода с точки на точку размеры установки выгодно подбирать такими, чтобы расстояния между заземлениями A и B , A' и B' , M и N были кратны шагу установки. Разнос питающих заземлений $A'B'$ обычно выбирает наименьшим, т. е. равным утроенной величине разноса приемных заземлений.

Полевые работы. Последовательность проведения полевых операций при профилировании установкой с двойными разносами отличается от порядка работы с установкой АМNB только тем, что после окончания замеров на большом разносе производят переключение питающей линии на малый разнос для определения ρ_k на этом разносе. Каждый раз, переключив заземления, рабочие сигнализируют о готовности линии к измерениям.

Результаты наблюдений с установкой АА'МNB'В записывают в полевой журнал, форма которого приведена ниже.

Журнал для записи наблюдений методом профилирования с установкой АА'МNB'В

Участок . . . Профиль . . . Азимут . . . Дата . . .
 АВ . . . А'В' . . . MN . . . Шаг . . . Начало наблюдений . . .
 К . . . К' . . . Батарей Конец наблюдений . . .
 Погода

№ точки (пикета)	АВ				А'В'				Примечание
	ΔU , мВ	I , сА	ρ_k , Ом·м	ρ_k , ср', Ом·м	ΔU , мВ	I , сА	ρ_k , Ом·м	ρ_k , ср', Ом·м	

Оператор Вычислитель Проверил

В графу «Примечание» записывают те же сведения, что и в аналогичную графу журнала при профилировании установкой АМNB.

По подсчитанным значениям ρ_k строят графики ρ_k , карты изом и реже карты графиков ρ_k . Способы построения их изложены выше.

§ 4. ПРОФИЛИРОВАНИЕ С НЕПОДВИЖНЫМИ ПИТАЮЩИМИ ЗАЗЕМЛЕНИЯМИ (СЪЕМКА СРЕДИННЫХ ГРАДИЕНТОВ)

При электропрофилировании на участках со сложным геоэлектрическим разрезом (например, в областях развития карста, в пределах сложно построенных рудных полей и т. п.) условия заземления питающих электродов могут оказать существенное влияние на форму графика ρ_k и сильно исказить его. Так, если в процессе перемещения четырехточечной установки по профилю между одним из питающих заземлений (например, А) и приемными заземлениями окажется плохо проводящая кварцевая жила или дайка, то она экранирующим образом повлияет на распределение тока в земле. Электрический ток будет обтекать плохо проводящую жилу, и поэтому в области между приемными заземлениями плотность тока окажется уменьшенной. Понижение плотности тока в свою очередь приведет к уменьшению разности потенциалов между заземлениями М и N и, следовательно, к понижению величины кажущегося сопротивления.

При дальнейшем перемещении по профилю заземление А перейдет через жилу и окажется по одну сторону от нее с приемными заземлениями. В этом положении установки электрический ток будет «отжиматься» жилой в сторону приемной цепи. Увеличение плотности тока между приемными заземлениями в данном случае приведет к увеличению ρ_k . Таким образом, переход питающего заземления

через плохо проводящее тело отметится на графике электропрофилеирования двумя экстремумами — максимумом и минимумом кажущегося сопротивления. Такими же экстремумами будет отмечен на графике переход через жилу второго питающего заземления. Наличие на графике ρ_k нескольких экстремумов, связанных с экранными эффектами у заземлений, значительно осложнит вид графика и затруднит его интерпретацию.

Для уменьшения искажающего влияния неоднородной среды вблизи заземлений применяют модификацию электропрофилеирования с неподвижными питающими заземлениями — съемку срединных

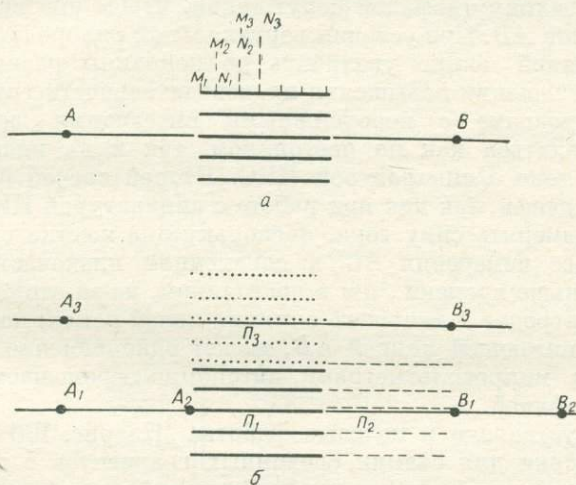


Рис. 99. Порядок работы при съемке срединных градиентов.
 а — расположение профилей и перемещение приемных заземлений по профилю; б — расположение планшетов.

градиентов. При этом способе профилирования A и B оставляют неподвижными, а приемные заземления перемещают вдоль профилей, параллельных линии AB . Совокупность этих профилей образует так называемый планшет. Длина каждого профиля не должна превышать одной трети расстояния между питающими заземлениями. Планшет, состоящий обычно из 5—20 профилей, располагают таким образом, чтобы его центральный профиль совпадал со средней третью либо средней половиной линии AB (рис. 99).

В однородной среде напряженность поля двух точечных источников в пределах средней трети расстояния между ними изменяется незначительно, поэтому при наблюдениях над неоднородной средой можно более четко выявить искажающее влияние геологических образований, нарушающих электрическую однородность среды.

Расстояние между питающими заземлениями и, следовательно, размеры планшета выбирают в соответствии с геологической обстановкой и требуемой глубинностью исследований. Иногда этот выбор обосновывают рекогносцировочными зондированиями. Из целесообразных

разносов питающих заземлений выбирают по возможности наибольшие, чтобы при одном их положении заснять большую площадь.

Разносы приемной линии определяются размерами изучаемых объектов и детальностью работ. В том, весьма характерном для данного метода случае, когда задачей работ является выявление и прослеживание крутопадающих, плохо проводящих геологических образований, разнос MN не должен превышать 2—5-кратной мощности этих образований.

Если геоэлектрический разрез на исследуемой площади изменчив в вертикальном направлении, то во избежание осложнения вида графиков ρ_k длину профилей берут такой, чтобы она не превышала треть разносов AB . При условии вертикальной однородности разреза длину профилей можно увеличить до половины разноса AB , что выгодно в отношении повышения производительности труда.

Профилирование с неподвижными питающими заземлениями может проводиться как на постоянном, так и на низкочастотном переменном токе с аппаратурой ИКС. Второй способ более производителен и дешевле, так как при работе с аппаратурой ИКС нет необходимости измерять силу тока, поскольку она жестко стабилизирована; процесс измерения ΔU в переменном низкочастотном поле занимает меньше времени, чем в постоянном, из-за отсутствия поляризации электродов и меньшего влияния полей-помех; поле, создаваемое одной питающей линией AB , может одновременно измеряться несколькими микровольтметрами, автономно перемещаемыми вдоль соседних профилей.

Монтаж установки и полевые работы. На рис. 100 изображена схема установки для съемки срединных градиентов с аппаратурой ИКС, рассчитанная на проведение наблюдений одновременно с двумя измерительными линиями.

Заземления питающей линии осуществляют при помощи железных штыревых электродов. Генератор из комплекта ИКС-1, 50 или 600 (в зависимости от размеров питающей линии) включают последовательно в питающую линию на любом удобном ее участке. Во избежание индуктивных наводок провода этой линии раскладывают так, чтобы они отстояли от профилей, на которых ведутся измерения, не менее чем на 10 м.

В качестве заземлений измерительных линий применяют тонкие стержни с деревянной ручкой и клеммами для подключения проводов. Заземления такой конструкции входят в комплект аппаратуры ИКС.

При работе с неподвижными питающими заземлениями генератор прямоугольных импульсов целесообразно питать от внешней батареи большой емкости (например, 29-ГРМЦ-13) или от бензоэлектрического агрегата. Перед включением генератора оператор контролирует напряжение агрегата или батареи по стрелочному прибору, расположенному на пульте.

Убедившись в нормальной работе генератора, оператор подает условный сигнал, по которому операторы измерительных линий начинают измерения при помощи измерителей — микровольтметров.

Микровольтметры следует включать на рабочий режим не менее, чем за 5 мин до начала измерения и не выключать, если перерыв между измерениями не превышает 15 мин.

Наблюдения на профиле проводят в следующем порядке. Приемные заземления помещают в две крайние точки одного из профилей (положение M_1N_1 на рис. 99, а) и измеряют разность потенциалов между этими точками. Затем перемещают приемные заземления вдоль профиля на расстояние, равное принятому шагу профилирования (обычно шаг бывает равен расстоянию между приемными

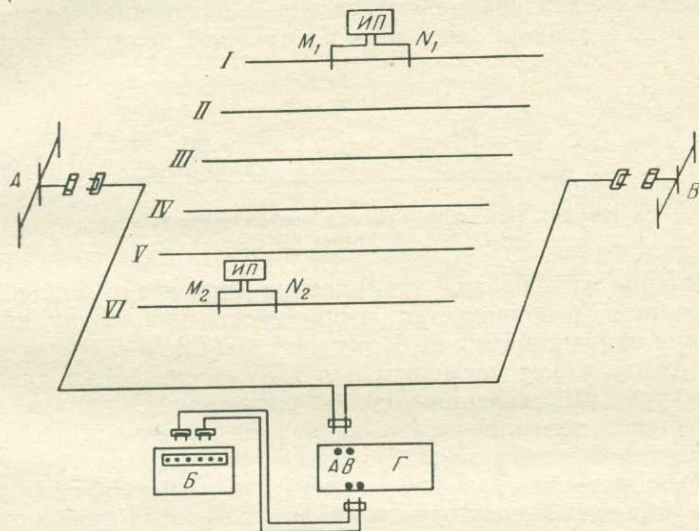


Рис. 100. Монтажная схема установки для съемки срединных градиентов с аппаратурой ИКС.

Г — генератор комплекта ИКС; Б — батарея (или бензоэлектрический агрегат); ИП — измерительный прибор; I—VI — профили.

заземлениями), и измерение повторяют. Таким образом проводят наблюдения вдоль всего профиля. После этого приемные заземления переносят на следующий профиль и в том же порядке продолжают измерения. После окончания измерений на первом планшете $П_1$ питающие заземления перемещают во второе положение A_2B_2 так, чтобы смежные планшеты $П_1$ и $П_2$ перекрывались по концам профилей. При перемещении питающих заземлений в положение A_3B_3 соответствующие планшеты $П_1$ и $П_3$ должны перекрываться крайними профилями. Схема перемещения установки изображена на рис. 99, б.

При съемке срединных градиентов ρ_k вычисляют по формуле (III.3); коэффициент установки определяют из выражения (III.2) или по следующей приближенной формуле:

$$K = \frac{0.2}{r_{MN} \left(\frac{\cos \varphi_1}{r_{AO}^2} + \frac{\cos \varphi_2}{r_{BO}^2} \right)}$$

Изображение результатов. Результаты съемки срединных градиентов изображают в виде графиков кажущегося сопротивления или градиентов потенциала вдоль профиля. На этих графиках данные для каждого положения питающих заземлений наносят в виде отдельных отрезков кривых, как показано на рис. 102. Смещение отрезков в точках перекрытия планшетов обусловлено влиянием неоднородностей у питающих заземлений при их перестановке, что должно учитываться при истолковании графиков.

При площадной съемке результаты наблюдений изображают в виде карт графиков ρ_k .

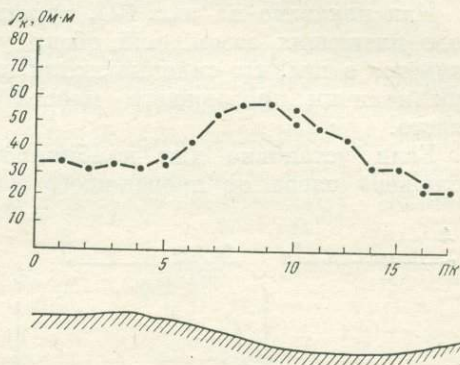


Рис. 102. График кажущегося сопротивления по данным съемки срединных градиентов ($AB = 300$ м, $MN = 20$ м).

§ 5. КОМБИНИРОВАННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

При применении рассмотренных выше модификаций электрического профилирования электрическое поле изучают либо в центре отрезка, соединяющего питающие заземления (симметричные установки), либо в средней трети этого отрезка (съемка срединных градиентов). Выше указывалось, что эти установки являются малоэффективными при поисках и картировании маломощных крутопадающих хорошо проводящих образований, например жильных тел, сложенных хорошо проводящими рудами, или пластов антрацита и т. п.

Для поисков и прослеживания таких крутопадающих хорошо проводящих тел широко используется комбинированное профилирование.

Установка для комбинированного профилирования состоит из двух встречных несимметричных установок AMN и BMN с общим питающим заземлением C , отнесенным в бесконечность (см. гл. III). Заземления A и B , как показано на рис. 103, расположены симметрично центру приемной линии MN , являющейся общей для обеих установок. Заземления A , M , N и B перемещают по профилю через интервалы, равные шагу установки, и при каждом положении установки выполняют два определения кажущегося сопротивления: одно установкой AMN , $C \rightarrow \infty$, другое — установкой BMN , $C \rightarrow \infty$. Это дает возможность получить по профилю два графика ρ_k отдельно для каждой установки. Совместное рассмотрение обоих графиков позволяет в ряде случаев выявить особенности геологического разреза более уверенно, чем по другим модификациям электропрофилирования.

В качестве примера рассмотрим комбинированное профилирование над тонким крутопадающим хорошо проводящим пластом, залегающим среди плохо проводящих пород.

Как показано на рис. 104, хорошо проводящий пласт искажает поле питающих заземлений обеих установок. Это искажение проявляется в том, что силовые линии, радиальные в однородной среде, при наличии проводящего пласта отклоняются в сторону этого пласта.

Если установка для комбинированного профилирования расположена слева от проводящего пласта (рис. 104, положение I),

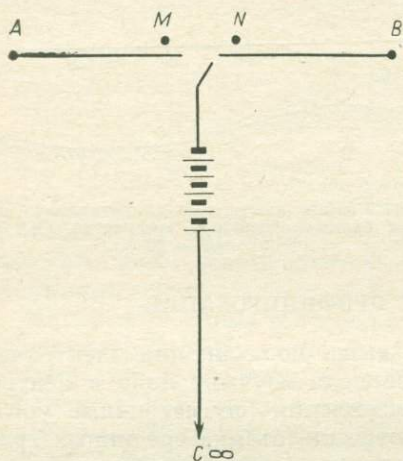


Рис. 103. Установка для комбинированного профилирования.

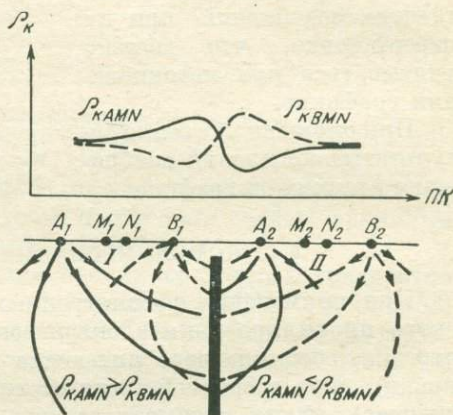


Рис. 104. Комбинированное профилирование над тонким крутопадающим пластом.

кажущееся сопротивление ρ_{kAMN} определяемое установкой AMN, $C \rightarrow \infty$, будет больше, чем кажущееся сопротивление ρ_{kBMN} , определяемое установкой BMN, $C \rightarrow \infty$, так как плотность тока между приемными заземлениями первой установки будет больше, чем у второй. Если установка для комбинированного профилирования расположена справа от проводящего пласта (рис. 104, положение II), соотношение сопротивлений, определяемых обеими установками, будет обратным. Таким образом, график ρ_k слева от пласта для установки AMN расположится выше графика ρ_k для установки BMN. Справа от пласта расположение графиков будет обратным. Непосредственно над пластом обе кривые пересекаются, образуя так называемое «проводящее перекрестие»¹.

Следует отметить, что существенным недостатком комбинированного профилирования является громоздкость установки для полевых работ, вызванная необходимостью устройства заземления в бесконечности, т. е. на большом расстоянии от приемных заземлений.

¹ Иногда вместо этого термина пользуются термином «прямое перекрестие».

Монтаж установки. Монтажная схема установки для комбинированного профилирования изображена на рис. 105. Оператор с автокомпенсатором или другим измерительным прибором располагается в центре приемной линии, куда подведены провода от заземлений A и B .

Батареи устанавливают на одном из концов или в центре профиля. Один из полюсов батареи при помощи длинного провода, намотанного на катушку K_C , заземляют в бесконечности, а второй полюс посредством провода, намотанного на катушку K_A , соединяют через выключатель автокомпенсатора с заземлением A или B в зависимости от того, на каком крыле установки измеряется ρ_k . Наличие

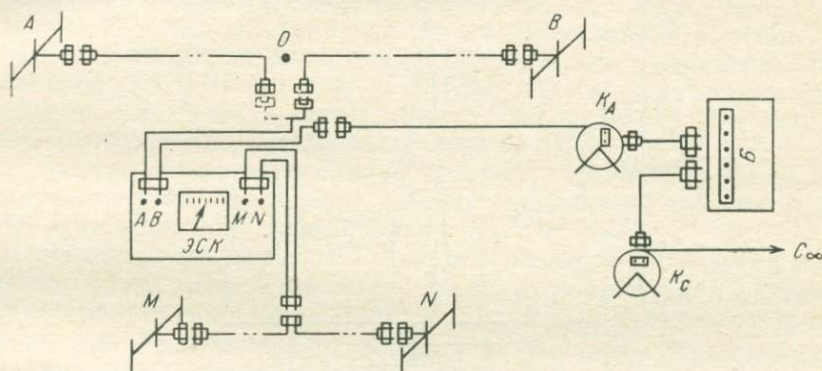


Рис. 105. Монтажная схема установки для комбинированного профилирования с ЭСК.

катушки K_A позволяет перемещать установку по профилю без переноса батареи и проводов, идущих к заземлению C . Весьма желательно снабжать эту катушку скользящим контактом для разматывания провода без отключения батареи. Катушку K_A можно заменить легкой полевой телефонной катушкой и переносить ее при перемещении установки вместе с прибором.

Все соединения на центре и особенно концы проводов, идущих к питающим заземлениям A и B , должны быть тщательно размечены во избежание ошибок при полевых наблюдениях. Провода, соединяющие заземления A и B с центром установки, связывать между собой на центре не следует, так как в процессе полевых работ оба крыла установки перемещают по профилю порознь.

Весьма ответственным является выбор точки для заземления в бесконечности. С одной стороны, расстояние до удаленного заземления должно быть таким, чтобы его полем можно было пренебречь (см. гл. III); с другой стороны, заземление C целесообразно относить на такое расстояние от снимаемых профилей, чтобы им можно было пользоваться для всех или по крайней мере для нескольких профилей. Это позволяет избежать частого перемещения этого заземления при переходе с профиля на профиль.

При вычислении кажущегося сопротивления коэффициент K определяют по формуле (III.6) для трехточечных установок. Очевидно, коэффициент для обеих установок, из которых состоит установка комбинированного профилирования K_{AMN} и K_{BMN} , имеет одинаковое значение.

Полевые работы. Наблюдения на профиле начинают с измерения силы тока и разности потенциалов при включении в питающую цепь переднего по ходу установки питающего заземления.

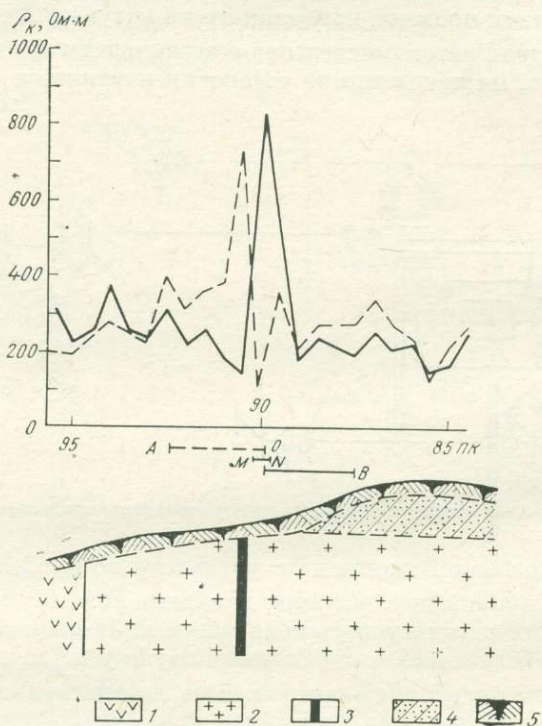


Рис. 106. График комбинированного профилирования над рудной жиллой (по В. Е. Зайцеву).

1 — порфириты; 2 — граниты; 3 — рудная жила; 4 — песчаники; 5 — поверхностные отложения.

После того как вычислитель подсчитал значение ρ_k и наложил соответствующую точку на график, по сигналу оператора рабочие перемещают переднее крыло питающей линии на следующую точку; в это время проводятся измерения на заднем крыле установки. После окончания замеров оператор отключает соединительные провода у измерительного прибора и подает команду к перемещению всей установки на следующую точку. По этой команде рабочий у катушки с проводом, идущим от батареи к прибору (см. рис. 107), отключает вилку и выпускает отрезок провода, необходимый для перестановки потенциометра на следующую точку. Рабочие на центре и приемных

заземлениях перетаскивают заднее крыло питающей линии и приемную линию вперед на расстояние, равное принятому шагу установки. На новой точке измерения начинают с переднего крыла, которое к этому времени должно быть подготовлено. В первую очередь измеряют силу тока (в это время подготавливается приемная цепь), а затем разность потенциалов.

Окончив измерения на одном профиле, перемещают установку на соседний профиль. Если разнос питающих заземлений не превышает 100 м и местность незалесенная, то при переносе нет необходимости сматывать питающую цепь. При работе с большими установками и в труднопроходимых районах питающие цепи при переходе с профиля на профиль приходится сматывать.

Форма полевого журнала для записи наблюдаемых величин совпадает с приведенной выше формой журнала для профилирования установкой АА'МNB'В, причем графы для записи результатов измерений с большой и малой линиями используются для записи данных, полученных с установками АМN и ВМN.

В графе «Примечание», помимо заносимых обычно при профилировании сведений, обязательно отмечают положение крыльев установки относительно концов профиля.

Изображение результатов. Результаты полевых наблюдений изображают в виде графиков кажущегося сопротивления по профилям. При построении графиков значения $\rho_{\text{КАМN}}$ и $\rho_{\text{КВМN}}$ относят к точке наблюдений (середине приемной линии МN) и таким образом получают две кривые: одну сплошную для прямой установки, другую пунктирную для обратной установки. Под графиками строят рельеф дневной поверхности и геологический разрез, а также в масштабе показывают размеры установки и положение ее крыльев (ключ установки).

На рис. 106 изображен график комбинированного профилирования над хорошо проводящей рудной жилой в гранитах.

§ 6. ДИПОЛЬНОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

Рассмотренные выше модификации электрического профилирования основаны на изучении электрических полей точечных источников. Особенность дипольного профилирования заключается в том, что в данном случае изучаются поля диполей.

При дипольном профилировании могут использоваться установки различных типов. Из них чаще применяются параллельные установки и среди последних — дипольно-осевые. В этой установке, как указывалось выше, питающий и приемный диполи лежат на одной прямой, обычно совпадающей с направлением профиля.

Основное преимущество дипольного профилирования перед другими модификациями электрического профилирования состоит в том, что графики ρ_k , полученные при дипольном профилировании, более дифференцированы, благодаря чему можно более уверенно обнаруживать искомые геологические объекты и определять их местоположение.

На рис. 107 в качестве примера, иллюстрирующего это положение, изображены графики ρ_k , рассчитанные для профилирования дипольно-осевой и симметричной установками над вертикальным контактом пород с сопротивлениями ρ_1 и $\rho_2 = 0,1 \rho_1$. Сравнивая кривые на рис. 107, можно видеть, что в области контакта амплитуда изменения кажущегося сопротивления, определенного дипольной установкой, больше амплитуды ρ_k , измеренного симметричной установкой. Таким образом, задачу картирования контакта можно успешнее решить при помощи

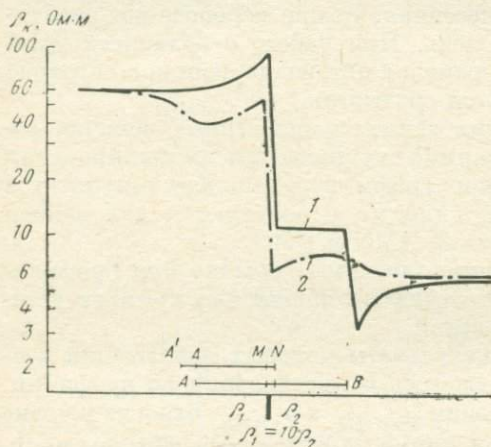


Рис. 107. Графики ρ_k над контактом двух пород с сопротивлениями ρ_1 и $\rho_2 = 1/10 \rho_1$. Для установок: 1 — дипольно-осевой, 2 — симметричной.

дипольной установки.

Другим преимуществом дипольного профилирования является то, что разносы установки, т. е. расстояния между центрами питающего и приемного диполей, необходимые для исследования какого-либо разреза, могут быть меньше, чем разносы симметричной установки, требуемые для исследования того же разреза. На это преимущество дипольной установки уже указывалось при рассмотрении дипольного зондирования.

К недостаткам дипольного профилирования следует отнести большое влияние

поверхностных неоднородностей, осложняющих форму графиков ρ_k . Это обстоятельство затрудняет, а иногда даже делает нецелесообразным применение дипольного профилирования в районах с неоднородными покровными отложениями и пересеченным рельефом дневной поверхности.

Недостатком дипольных установок является также быстрое уменьшение напряженности поля между измерительными заземлениями с увеличением расстояния между питающим и приемным диполями, вследствие чего при профилировании с большими разносами приходится пользоваться источниками тока повышенной мощности или увеличивать размеры диполей.

На рис. 94, в изображена схема установки для двухстороннего дипольного профилирования, у которой в отличие от односторонней установки (см. рис. 94, б), по обе стороны от приемного диполя MN на равных расстояниях расположены два питающих диполя A_1A_2 и B_1B_2 . При каждом положении установки на профиле производят два замера кажущегося сопротивления: один с питающим диполем A_1A_2 (прямая установка), другой — с питающим диполем B_1B_2 (обратная установка). Оба значения ρ_k относят обычно к середине

приемного диполя MN . Таким образом, в процессе электропрофилеирования двухсторонней дипольно-осевой установкой получают два графика ρ_k . Это дает возможность, с одной стороны, по соотношению значений кажущегося сопротивления, полученных с различными питающими диполями, судить об изменении геологического разреза в обе стороны от центра установки и, с другой стороны, учесть влияние рельефа и поверхностных неоднородностей вблизи приемных заземлений.

Двухстороннее дипольно-осевое профилирование, так же как и комбинированное профилирование, может быть применено для поисков крутопадающих хорошо проводящих тел пластового типа.

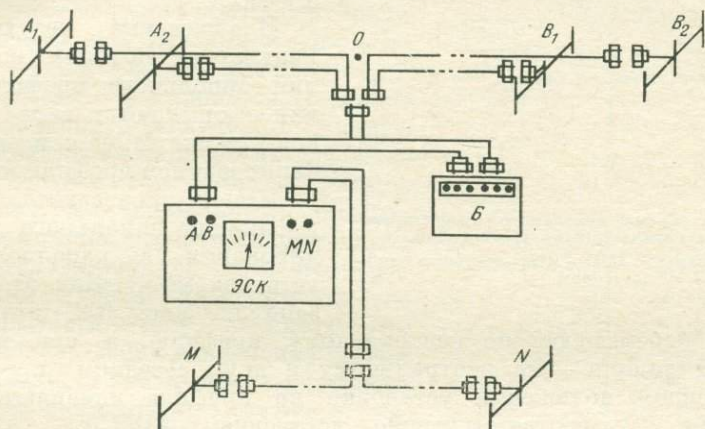


Рис. 108. Монтажная схема установки для двухстороннего дипольно-осевого профилирования с ЭСК.

Экранные эффекты и в данном случае обеспечивают достаточно четкую разницу в соотношении значений кажущегося сопротивления, измеренного различными крыльями установки по обе стороны от проводящего тела.

Отсутствие в установке для двухстороннего дипольного профилирования заземления в бесконечности позволяет значительно упростить полевые операции по сравнению с комбинированным профилированием и повысить производительность работ.

При двухстороннем профилировании размер измерительного диполя, как правило, должен быть меньше размера питающего диполя. Это дает возможность проводить детальные исследования при поисках и картировании маломощных крутопадающих объектов — пластов каменного угля, жил, даек и т. п.

Монтаж установки и полевые работы. Монтажная схема установки для двухстороннего дипольно-осевого профилирования изображена на рис. 108. Провода, идущие от центра установки к питающим заземлениям A_1 и A_2 , а также к заземлениям B_1 и B_2 , для удобства переноски установки по профилю скрепляют между собой

через интервалы 10—20 м и связывают в центре установки в одну линию.

Порядок выполнения полевых операций в значительной мере аналогичен последовательности работ при профилировании установкой АА'МNB'В. Коэффициент установки вычисляют по формуле (III.8).

Форма журнала для записи полевых наблюдений подобна форме журнала для профилирования установкой АА'МNB'В. В графе «Примечание» должно быть указано положение питающих диполей относительно концов профиля.

Изображение результатов. Результаты полевых наблюдений дипольного профилирования оформляют в виде графиков ρ_k так же, как и при комбинированном профилировании.

Весьма производительна модификация дипольного профилирования с параллельными установками¹. Как это показано на рис. 109, питающий

Рис. 109. Схема дипольного профилирования с параллельными установками. Г — генератор; ИП — измерительные приборы.

диполь перемещают по центральному профилю, а три измерительных диполя — по центральному и двум соседним профилям. При каждом положении установки на профиле измеряются три значения ρ_k , соответствующие установкам АВМ₁N₁, АВМ₂N₂ и АВМ₃N₃. При построении графиков ρ_k значения этого параметра относят к центру измерительных диполей.

Профилирование подобной установкой целесообразно выполнять при помощи аппаратуры ИКС, поскольку в этом случае питающие и измерительные диполи автономны, т. е. не связаны друг с другом соединительными проводами. В этом случае генератор комплекта ИКС (рис. 109) подключают к диполю АВ, а измерения ведут тремя измерителями аппаратуры ИКС.

§ 7. КРУГОВОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ (СНЯТИЕ ПОЛЯРНЫХ ДИАГРАММ ρ_k)

При инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях, а также при изучении структур рудных и шахтных полей часто возникает необходимость определения господствующего направления трещиноватости. Возможность решения этой задачи электрическими методами основана на том, что трещиноватые и рассланцованные горные породы при наличии явно выраженного господствующего направления трещин или поверхностей расланцевания

¹ Иногда эту модификацию называют площадным электро-разведочным картированием.

обычно обладают электрической анизотропией. Удельное сопротивление таких пород в направлении трещиноватости и сланцеватости, как правило, меньше удельного сопротивления пород вкрест трещиноватости.

Если же на дневной поверхности над такими анизотропными породами определить кажущееся сопротивление установкой, ориентированной вкрест трещиноватости, то его значение окажется меньшим, чем при измерении установкой, ориентированной по направлению трещиноватости. Это явление известно под названием парадокса анизотропии.

Физически парадокс анизотропии можно объяснить следующим. В анизотропной среде электрический ток, так же как и в изотропной среде, распространяется по радиальным прямым, выходящим из точечного источника (см. гл. II). Однако плотность его в направлении лучшей проводимости (по трещиноватости или сланцеватости) будет больше, чем в перпендикулярном направлении. Увеличение плотности тока ведет к увеличению разности потенциалов между приемными заземлениями, расположенными в направлении лучшей проводимости, по сравнению с разностью потенциалов, измеряемой между приемными заземлениями, расположенными перпендикулярно к первым. Соответственно кажущееся удельное сопротивление по трещиноватости или сланцеватости будет больше, чем в поперечном направлении.

Парадокс анизотропии используется для определения господствующего направления трещиноватости, а также простирающихся рассланцованных горных пород. Для решения подобных задач применяют круговое электропрофилирование. Этот способ профилирования заключается в наблюдении кажущегося сопротивления симметричной установкой, питающие и измерительные заземления которой после каждого измерения перемещают вокруг ее неподвижного центра (рис. 110, а). Таким образом, круговое профилирование позволяет установить в точке наблюдения зависимость кажущегося сопротивления от ориентировки (азимута

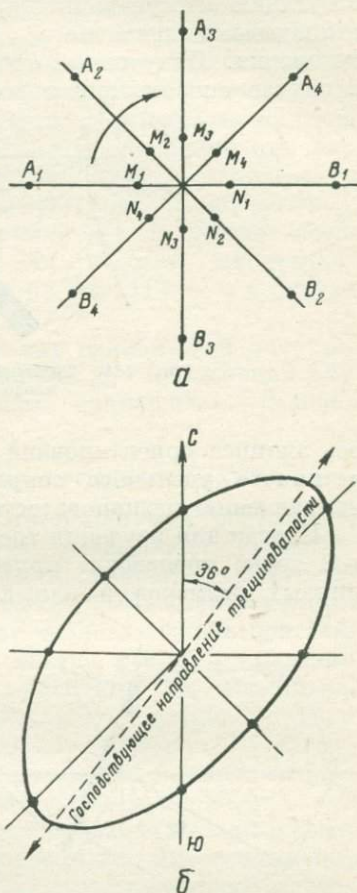


Рис. 110. Круговое профилирование.

а — перемещение заземлений при круговом профилировании; б — полярная диаграмма ρ_k .

разносов) установки. Результаты наблюдений изображают в виде полярной диаграммы ρ_k , построение которой показано на рис. 110, б. Из точки наблюдения, как из центра, проводят радиусы в соответствующих азимутах; на каждом радиусе в определенном масштабе откладывают значение ρ_k , наблюдаемое при данном положении установки. Полученные точки соединяют кривой линией, которая в случае анизотропии пород представляет собой эллипс; большая

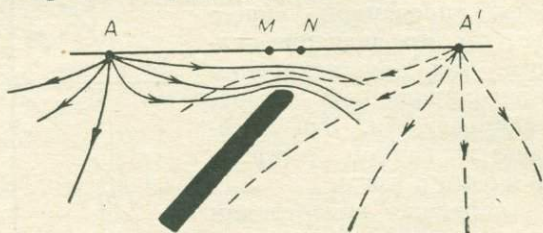


Рис. 111. Трехточечная установка AMN, $B \rightarrow \infty$ над плохо проводящим пластом.

ось эллипса ориентирована в направлении минимального значения истинного удельного сопротивления, т. е. по господствующему направлению трещиноватости или сланцеватости пород.

Иногда для изучения трещиноватости на разной глубине на каждой точке производят круговое профилирование установками различных размеров и для каждого разноса питающих заземлений

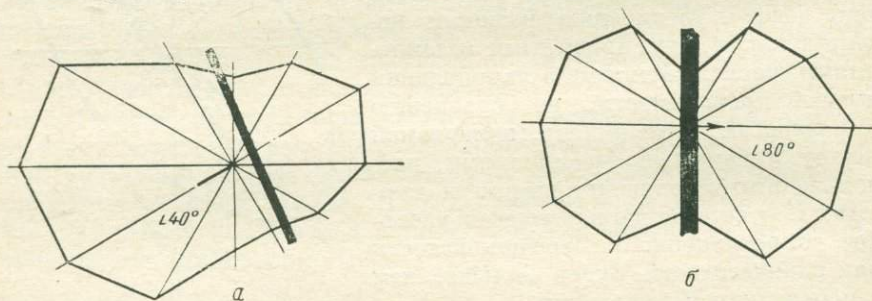


Рис. 112. Полярные диаграммы ρ_k над пластами каменного угля (по И. М. Блоху и Е. А. Шемякину).

В случае: а — наклонного пласта, б — вертикального пласта.

строят отдельную полярную диаграмму ρ_k . С этой же целью можно проводить в каждом азимуте вертикальные зондирования и затем по данным этих зондирований строить полярные диаграммы ρ_k для отдельных разносов. Этот способ исследования называется **к р у г о в ы м в е р т и к а л ь н ы м з о н д и р о в а н и е м**.

Круговое электропрофилерование несимметричными установками может быть применено для определения направления падения пластов, сопротивление которых больше сопротивления вмещающих пород.

На рис. 111 изображены два положения трехточечной установки AMN, $B \rightarrow \infty$ над наклонным пластом высокого сопротивления. При обоих положениях установки кажущееся сопротивление выше сопротивления среды, вмещающей пласт, за счет увеличения плотности тока в области между приемными заземлениями. Однако, если питающее заземление расположено по падению пласта, отмеченный выше эффект сказывается сильнее, чем тогда, когда питающее заземление отнесено от приемных по восстанию пласта. Наименьшее влияние пласта на распределение тока в земле будет наблюдаться при расположении питающего заземления установки AMN в направлении простирания пласта. Из сказанного следует, что зависимость ρ_k от азимута установки (полярная диаграмма ρ_k) в случае, когда измерительные заземления находятся над головой наклонного пласта, должна иметь вид, изображенный на рис. 112, а, а в случае, когда пласт вертикален, — на рис. 112, б.

Асимметрия полярной диаграммы ρ_k над наклонными пластами высокого сопротивления служит обоснованием для применения кругового профилирования при определении направления падения пласта.

§ 8. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ

Существенное различие в приемах интерпретации результатов полевых наблюдений, полученных двумя модификациями метода сопротивлений — зондированием и профилированием, заключается в том, что в методе ВЭЗ интерпретация обычно носит количественный характер, т. е. в результате ее получают числовые характеристики разреза (значения мощностей пластов, иногда углов их падения, сопротивлений различных горизонтов, величины их продольной проводимости и др.). Интерпретация результатов электропрофилирования, как правило, носит качественный характер. В процессе интерпретации по полевым материалам (графикам и картам) определяют тип геoeлектрического разреза (исследуемой площади, плановое положение геологических структур (оси складок, выходы пластов под покровные отложения, положение сбросов и т. п.), направление падения пластов и другие качественные характеристики разреза.

Для того чтобы в процессе интерпретации по картам изом и графикам ρ_k качественно определить характер геoeлектрического разреза, интерпретатор сопоставляет фактический полевой материал с графиками и картами, полученными расчетным путем или посредством моделирования для типичных геологических структур.

В настоящее время получено большое число теоретических кривых ρ_k для различных установок, применяемых при электропрофилировании. Эти кривые отображают разнообразные геологические разрезы — с вертикальными и наклонными плоскими поверхностями разделов, со сферическими и эллипсоидальными поверхностями разделов и др.

Из этих теоретических кривых чаще всего при интерпретации используют те, которые характеризуют разрезы с плоскими

вертикальными поверхностями разделов сред, имеющих различное удельное сопротивление.

Среди разнообразных разрезов последнего типа следует выделить три наиболее простых и в то же время достаточно типичных разрезы: 1) с вертикальным контактом двух сред; 2) с вертикальным пластом большой мощности; 3) с вертикальным пластом малой мощности¹.

Ниже излагаются основные принципы расчета графиков над перечисленными структурами.

Установка АМН. При измерениях этой установкой величину кажущегося удельного сопротивления вычисляют по общей формуле

$$\rho_k = K_2^2 \Delta U / I.$$

В том случае, когда величина приемной линии r_{MN} мала по сравнению с расстоянием от ее центра до питающего заземления, измеряемая разность потенциалов ΔU связана с напряженностью поля E следующим соотношением:

$$E = \Delta U / r_{MN}^2.$$

Таким образом,

$$\rho_k = K E r_{MN} / I.$$

Учитывая, что

$$K = 2\pi \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}},$$

$$\rho_k = 2\pi \frac{r_{AM} r_{AN}}{r_{MN}} \frac{E r_{MN}}{I}.$$

При малом разnose r_{MN} можно принять

$$r_{AM} \approx r_{AN} \approx r_{AO},$$

где r_{AO} — расстояние между питающим заземлением и центром приемной линии.

Таким образом,

$$\rho_k = 2\pi r_{AO}^2 \frac{E}{I}. \quad (V.1)$$

Напряженность поля точечного источника в присутствии плоского вертикального контакта двух сред, как показано в гл. II, определяется следующими выражениями:

$$E_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{x^2} - \frac{k_{12}}{(2d-x)^2} \right], \quad E_2 = \frac{\rho_2 I}{2\pi} \frac{1-k_{12}}{x^2}.$$

В этих выражениях x соответствует r_{AO} ; d — расстояние между питающим заземлением и контактом.

¹ Мощность пласта будем считать большой, если она превышает расстояние от центра измерительной линии до дальнего питающего заземления, малой — если она меньше этого расстояния.

Подставив значения E_1 и E_2 в выражение (V.1), получим следующие расчетные формулы для ρ_K :

$$\rho_{K1} = \rho_1 \left[1 - \frac{x^2 k_{12}}{(2d-x)^2} \right], \quad (V.2)$$

$$\rho_{K2} = \rho_2 (1 - k_{12}). \quad (V.3)$$

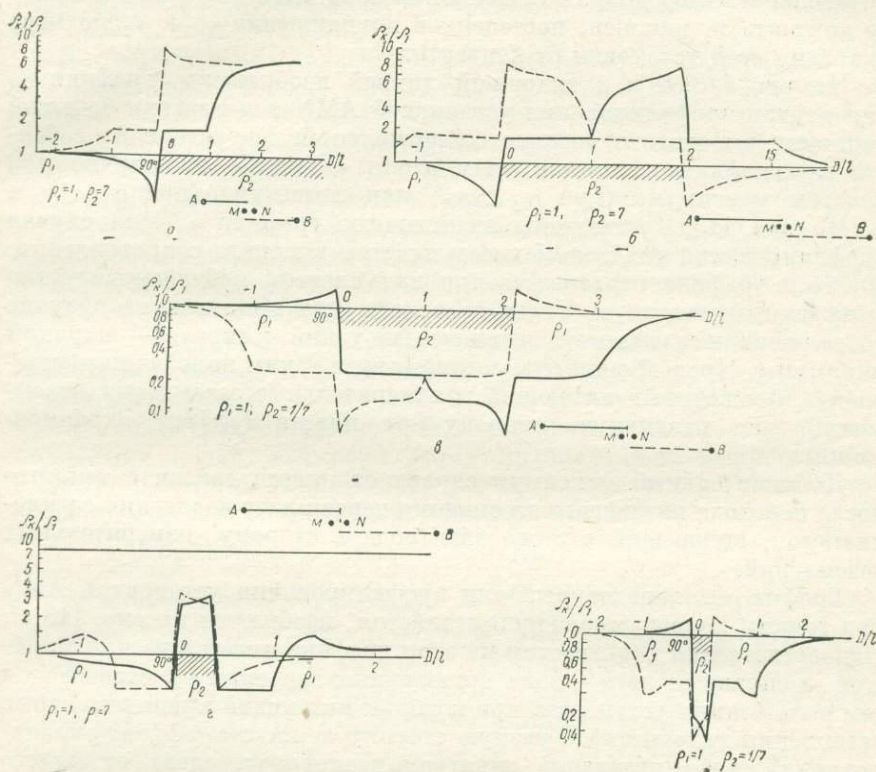


Рис. 113. Теоретические графики профилирования трехточечными установками.

Первое из этих выражений справедливо при $d \geq x$, второе — при $x \geq d \geq 0$. Выражение для ρ_K , соответствующее тому случаю, когда вся установка находится на поверхности среды с сопротивлением ρ_2 , можно получить из формулы (V.2), заменив в ней ρ_1 на ρ_2 и $k_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ на $k_{21} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = -k_{12}$:

$$\rho_{K3} = \rho_2 \left[1 + \frac{x^2 k_{12}}{(2d-x)^2} \right]. \quad (V.4)$$

График электропрофилирования установкой AMN над вертикальным контактом двух сред, рассчитанный по выражениям (V.2), (V.3) и (V.4), изображен на рис. 113, а.

Характерной особенностью этого графика является повышение или понижение (в зависимости от соотношения ρ_1 и ρ_2) значения кажущегося сопротивления при приближении измерительных заземлений к контакту, резкий скачок кажущегося сопротивления в момент перехода измерительных заземлений через контакт, постоянство сопротивления при тех положениях установки, в которых питающие и измерительные заземления находятся по разные стороны от контакта и, наконец, постепенное приближение ρ_k к ρ_2 по мере удаления всей установки от контакта.

На рис. 113, б и в сплошной линией изображены графики ρ_k для случая профилирования установкой АМН над пластом большой мощности высокого и низкого сопротивлений. Характерной особенностью графиков является асимметрия аномалии и наличие над пластом максимума (при $\rho_2 > \rho_1$) или минимума (при $\rho_2 < \rho_1$).

На рис. 113, г приведены аналогичные графики ρ_k для случая профилирования над маломощным пластом высокого сопротивления. На этом графике непосредственно над пластом наблюдается четко выраженный максимум. Слева от пласта (при принятом на рисунке расположении заземлений) сравнительно узкий, а справа — широкий минимумы. Правый минимум соответствует таким положениям установки, при которых питающий и измерительные заземления оказываются по различную сторону от пласта (эффект экранирования).

Дополнительный максимум справа от пласта связан с тем, что после перехода питающего заземления через пласт последний «отклоняет» ток, стекающий с этого электрода в сторону измерительных заземлений.

График ρ_k , характерный для профилирования установкой АМН над тонким хорошо проводящим пластом, изображен на рис. 113, д. Непосредственно под пластом на этом графике имеется четкий минимум, а справа от него — зона пониженных значений ρ_k , отвечающая тем положениям установки, при которых питающий и измерительные заземления находятся по разную сторону от пласта (эффект экранирования), либо питающий электрод расположен слева от пласта (близко от него).

Установка для комбинированного профилирования. Эта установка, как указывалось выше, представляет собой сочетание двух встречных трехточечных установок АМН и ВМН. В соответствии с этим графики ρ_k для комбинированного профилирования рассчитывают по формулам для трехточечных установок.

Из рис. 113, а—д можно получить представление о характере графиков комбинированного профилирования.

Контакт сред с различным сопротивлением (рис. 113, а) отмечается на одном из графиков ρ_k постепенным спадом кажущегося сопротивления от значения $\rho_k = \rho_2$ до значения $\rho_k = \rho_1$, а на втором — небольшим повышением ρ_k перед контактом, а затем быстрым его спадом непосредственно над контактом до значения ρ_1 . Совместное рассмотрение кривых позволяет определить положение контакта

более точно, чем по графикам ρ_k для симметричной четырехточечной установки.

Графики комбинированного профилирования над мощным пластом (рис. 113, б) отличаются тем, что каждый из контактов пласта с вмещающими породами характеризуется теми особенностями кривых, о которых говорилось выше. Таким образом, при совместном рассмотрении графиков удастся определить не только местоположение пласта, но и его мощность.

На теоретических кривых комбинированного профилирования над крутопадающим хорошо проводящим пластом (рис. 113, в) по обе стороны от пласта располагаются зоны пониженного значения ρ_k , ширина которых равна примерно половине расстояния между питающими заземлениями A и B . Непосредственно над проводящим пластом наблюдается перекрестие кривых.

На теоретических графиках комбинированного профилирования над крутопадающим плохо проводящим пластом наблюдаются отчетливые максимумы ρ_k на обеих кривых над пластом (рис. 113, г); по обе стороны от максимума на кривых имеются менее четко выраженные экстремумы, связанные с экранирующим влиянием пласта при приближении к нему питающих заземлений.

Симметричная установка AMNB. Для расчета графиков ρ_k , получаемых симметричной установкой, может быть использовано правило наложения полей. Согласно этому правилу напряженность поля в центре приемной линии может рассматриваться как сумма напряженностей полей, создаваемых заземлениями A и B :

$$E_{AB} = E_A + E_B.$$

Если обозначить через K_{AMN} и K_{BMN} коэффициенты соответствующих установок, через ΔU_A и ΔU_B — разность потенциалов между приемными заземлениями установок AMN и BMN и, наконец, через ρ_{kAMN} и ρ_{kBMN} — кажущиеся сопротивления, полученные этими установками, то согласно выражению (III.40)

$$\rho_{kAMN} = K_{AMN} \frac{\Delta U_A}{I_A}, \quad \rho_{kBMN} = K_{BMN} \frac{\Delta U_B}{I_B}.$$

Учитывая, что

$$\Delta U = r_{MN} E,$$

получим

$$E_A = I_A \rho_{kAMN} / K_{AMN} r_{MN}, \quad E_B = I_B \rho_{kBMN} / K_{BMN} r_{MN};$$

отсюда

$$E_{AB} = \frac{I_A \rho_{kAMN}}{K_{AMN} r_{MN}} + \frac{I_B \rho_{kBMN}}{K_{BMN} r_{MN}}.$$

Поскольку токи, протекающие через оба заземления установки, равны, то

$$E_{AB} = \frac{I_{AB}}{r_{MN}} \left(\frac{\rho_{kAMN}}{K_{AMN}} + \frac{\rho_{kBMN}}{K_{BMN}} \right).$$

Кажущееся сопротивление, определяемое установкой AMNB, с учетом последнего выражения может быть рассчитано по следующей формуле:

$$\rho_{к AMNB} = K_{AMNB} \frac{\Delta U_{AB}}{I_{AB}} = K_{AMNB} \frac{r_{MN} E_{AB}}{I_{AB}} \left(\frac{\rho_{к AMN}}{K_{AMN}} + \frac{\rho_{к BMN}}{K_{BMN}} \right).$$

В частном случае для симметричной установки

$$K_{AMN} = K_{BMN} = 2K_{AMNB};$$

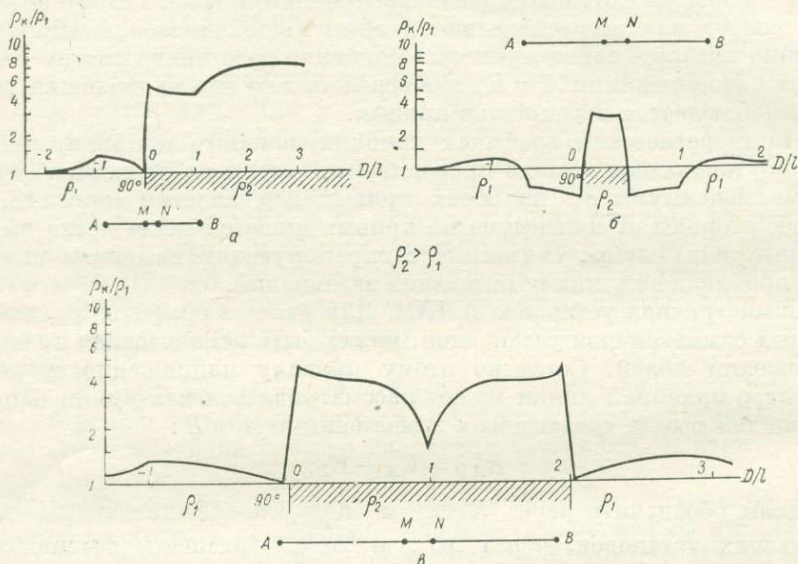


Рис. 114. Теоретические графики профилирования симметричной установкой AMNB ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 7$).

отсюда

$$\rho_{к AMNB} = \frac{\rho_{к AMN} + \rho_{к BMN}}{2}. \quad (V.5)$$

Из выражения (V.5) следует, что графики профилирования симметричной установкой AMNB могут быть получены простым осреднением графиков $\rho_{к}$ для трехточечной установки.

На рис. 114, а — в изображены графики $\rho_{к}$ для установки AMNB, рассчитанные для вертикального контакта и крутопадающего пласта большой и малой мощности. На этих графиках контакт в целом отражается ступенчатым изменением $\rho_{к}$, причем график осложняется дополнительными экстремумами и точками излома, связанными с переходом питающих и приемных заземлений через контакт. Пласт большой мощности на графиках $\rho_{к}$ отражается максимумом (или минимумом) также осложненной формы. Маломощный пласт высокого сопротивления четко выделяется максимумом на графике $\rho_{к}$.

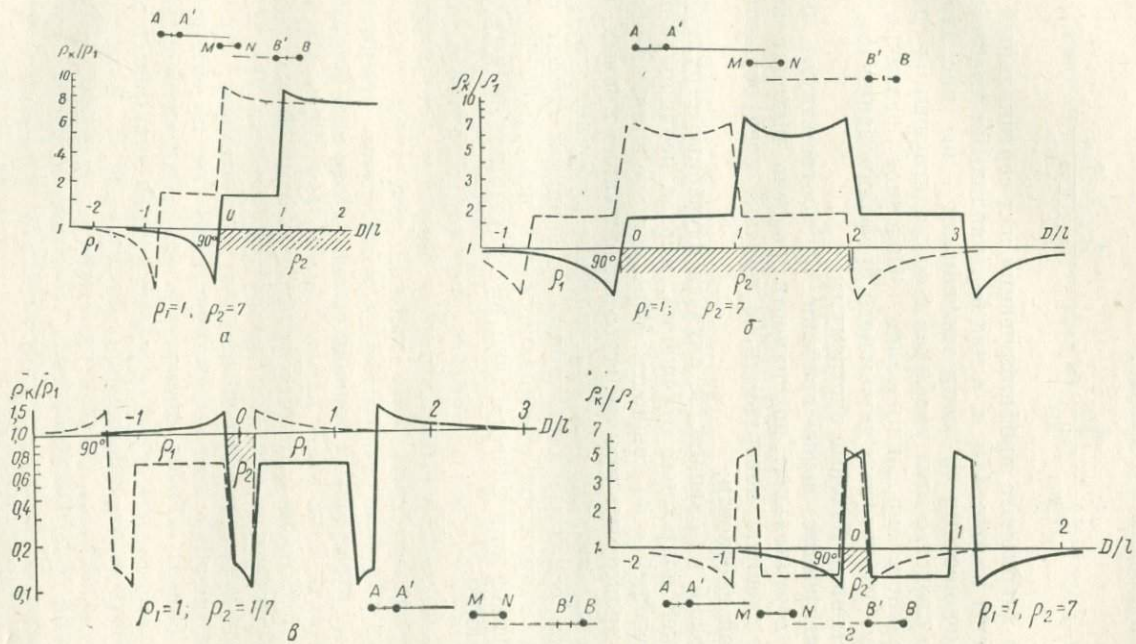


Рис. 115. Теоретические графики профилирования дипольно-осевой двухсторонней установкой.

Дипольно-осевая установка АА'МN. Кажущееся сопротивление, измеряемое этой установкой, связано с кажущимся сопротивлением для трехточечных установок АМN и ВМN следующим соотношением, которое мы приводим без вывода:

$$\rho_{к АА'МN} = \frac{r_{А'О}^2 - r_{МN}^2}{r_{А'О}^2 - r_{АО}^2} \rho_{к АМN} - \frac{r_{А'О}^2 - r_{МN}^2}{r_{А'О}^2 - r_{АО}^2} \rho_{к А'МN}. \quad (V.6)$$

Графики дипольного профилирования над вертикальным контактом приведены на рис. 115, а, а над вертикальными пластинами с различными мощностями и сопротивлениями — на рис. 115, б — г. Характерно сходство этих графиков с соответствующими графиками комбинированного профилирования. Основное различие заключается в том, что графики дипольного профилирования имеют более четко выраженные боковые экстремумы.

Все приведенные выше графики $\rho_{к}$ соответствуют разрезам, в которых вертикальные поверхности раздела выходят непосредственно на дневную поверхность, а контакт сред осуществляется по идеальной плоскости.

Практически в большинстве случаев изучаемые структуры перекрыты толщей покровных отложений, иногда неоднородной по составу и меняющейся по мощности. В результате влияния покровных отложений происходит прежде всего сглаживание кривых, а также уменьшение амплитуды или исчезновение побочных экстремумов. Вместе с тем основные характерные особенности графиков сохраняются, что и является обоснованием для использования теоретических графиков при качественной интерпретации данных электропрофилирования.

Глава VI

МЕТОД ЗАРЯДА

§ 1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

При разведке месторождений полезных ископаемых и при геолого-структурных исследованиях часто ставится задача прослеживания и оконтуривания геологических образований, вскрытых горными выработками, скважинами или в результате эрозии в одной или нескольких точках. Если эти образования сложены горными породами или рудами, электрическое сопротивление которых значительно меньше сопротивления вмещающих пород, сформулированная задача может быть решена методом заряда¹.

Сущность метода заряда заключается в том, что один из полюсов источника электрического тока заземляют непосредственно в прослеживаемом теле, а второй — за пределами исследуемой площади, на расстоянии, достаточно большом, чтобы влиянием его поля можно было пренебречь. Электрическое и реже магнитное поле заряженного таким образом тела исследуют на дневной поверхности тем или иным способом. По характеру распределения этого поля делают заключение о размерах, форме и положении разведываемого тела.

На рис. 116 показано положение токовых и эквипотенциальных линий вокруг заряженного тела, имеющего неправильную, но в общем изомерную форму. Если заряженное тело обладает значительно большей проводимостью, чем вмещающие породы, можно пренебречь падением потенциала внутри тела и принять его за эквипотенциальный проводник. В этом случае поверхность тела будет являться эквипотенциальной, а эквипотенциальные поверхности в окружающей среде вблизи заряженного тела повторяют его форму, причем тем точнее, чем больше различие между проводимостью тела и вмещающих пород.

По мере удаления от заряженного тела форма эквипотенциальных поверхностей теряет сходство с формой заряженного тела и зависит

¹ Иногда этот метод называют методом заряженного тела.

от электрического строения вмещающих пород. В случае однородной и изотропной вмещающей среды эквипотенциальные поверхности на большом расстоянии от тела приближаются по форме к сферам. Когда изучаемое тело залегает на небольшой по сравнению с его размерами глубине, некоторые из эквипотенциальных линий на дневной поверхности по форме близки к проекции заряженного тела на эту поверхность (рис. 116). Отсюда следует, что по результатам съемки эквипотенциальных линий на дневной поверхности

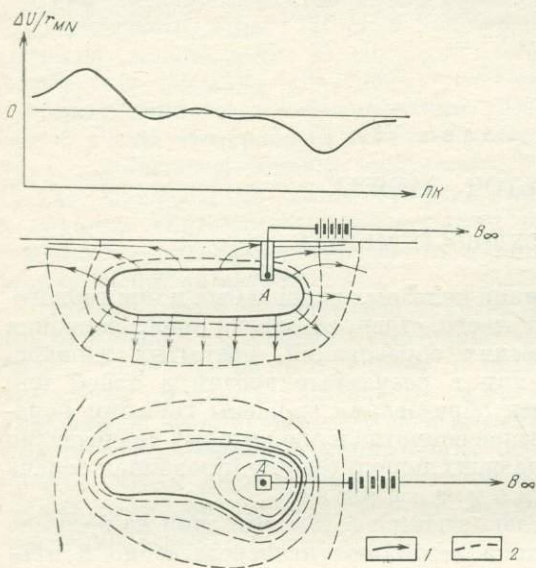


Рис. 116. Токовые линии (1) и эквипотенциальные поверхности (2) в пространстве заряженного тела (в разрезе и в плане) и график градиента потенциала на дневной поверхности.

применено к сильно вытянутым телам (жила, крутопадающий пласт и т. п.), так как в последнем случае даже при относительно хорошей проводимости тела падение потенциала в нем в направлении продольной оси будет значительным. Вследствие этого эквипотенциальные линии уже не будут повторять форму тела; они лишь окажутся вытянутыми в продольном его направлении. Применительно к таким телам метод заряда позволяет определить положение оси проекции головы рудной залежи на дневную поверхность.

Действительно, в каждом поперечном сечении тела ток растекается в обе стороны от него (рис. 117). Соответственно этому падение потенциала также будет происходить по обе стороны от тела. Таким образом, если проследить на дневной поверхности линию, по обе стороны от которой направление тока противоположно или, иначе говоря, при пересечении которой меняется знак градиента потенциала, то тем самым будет определено положение оси проекции заряженного тела на дневную поверхность.

над заряженным телом можно судить о форме этого тела. Для того чтобы определить, какая из эквипотенциальных линий наиболее близка к проекции заряженного тела, проводят измерения градиентов потенциала вдоль профиля, проходящего над заряженным телом через точку зарядки. На таком профиле вблизи проекции концов заряженного тела на дневную поверхность будут наблюдаться экстремумы градиента потенциала.

Предположение о том, что все точки рудного тела имеют равный потенциал, более или менее справедливое в отношении изомерных тел, не может быть

На рис. 117 изображены графики потенциала и градиента потенциала вдоль профиля, перпендикулярного к простиранию тела. Характерной особенностью графиков градиента является наличие экстремумов по обе стороны от заряженного тела. Расстояние между точками с экстремальными значениями градиента потенциала зависит от глубины верхней кромки заряженного тела. По этому расстоянию или по углу наклона кривой к оси расстояний в точке, в которой градиент потенциала меняет свой знак, может быть ориентировочно определена глубина до верхней кромки тела.

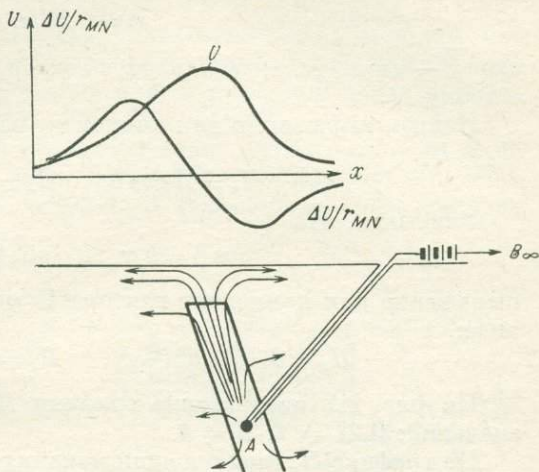


Рис. 117. Графики потенциала и градиента потенциала над заряженным крутопадающим пластообразным телом с высокой проводимостью.

На рис. 118 приведены графики вертикальной и горизонтальной составляющих магнитного поля вдоль профиля, перпендикулярного к заряженному пластообразному телу. Магнитное поле в данном случае можно рассматривать как совокупность магнитных полей линейных токов, текущих вдоль пласта. При приближенных расчетах такого поля источником его можно считать линейный ток, текущий вдоль пласта вблизи его верхней кромки.

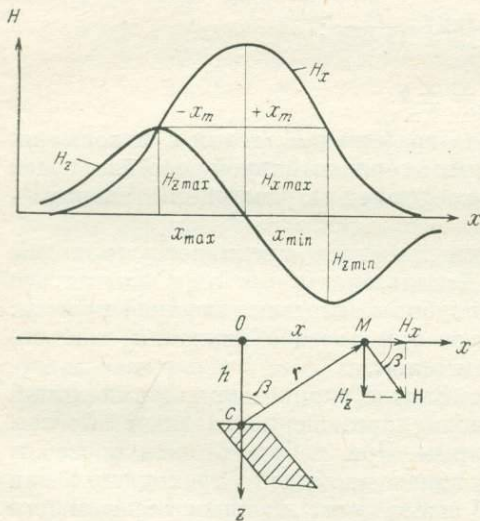


Рис. 118. Графики горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля над заряженным крутопадающим пластообразным телом.

Предположим, что под земной поверхностью расположен горизонтальный линейный проводник, через который течет ток I .

Введем систему координат с центром в точке O , расположенной на дневной поверхности над рудным телом, с осью x , направленной горизонтально, и с осью z — вертикально.

В точке M профиля, совпадающего с осью x , т. е. проходящего вкrest простирания

тела, напряженность магнитного поля \mathbf{H} согласно закону Био — Савара определится следующим образом:

$$\mathbf{H} = 0,2I/\mathbf{r},$$

где I — сила тока; \mathbf{r} — радиус-вектор, проведенный из точки C в точку M .

Найдем выражения для компонент вектора \mathbf{H} по осям x и z , т. е. H_x и H_z .

$$H_x = H \cos \beta, \quad H_z = H \sin \beta.$$

Учитывая, что

$$\cos \beta = h/r \quad \text{и} \quad \sin \beta = x/r,$$

выражение для компонент вектора \mathbf{H} можем записать в следующем виде:

$$H_x = 0,2Ih/(h^2 + x^2), \quad H_z = 0,2Ix/(h^2 + x^2).$$

На рис. 118 изображены графики H_x и H_z , рассчитанные для значений: $0,2I = 1$; $h = 1$.

На графике H_x имеется один максимум, расположенный непосредственно над линейным проводником, т. е. при $x = 0$, а на графике H_z — максимум и минимум по обе стороны от этого проводника.

Если в выражении для H_x принять $x = 0$, то

$$H_{x \max} = 0,2I/h.$$

Найдем координаты x_m точек, в которых горизонтальная составляющая равна половине ее максимального значения:

$$\frac{1}{2} \frac{0,2I}{h} = 0,2I \frac{h}{h^2 + x^2};$$

отсюда

$$x_m = \pm h.$$

Можно также показать, что на графиках H_z точки с максимальным и минимальным значениями горизонтальной составляющей также будут отстоять от начала координат на расстоянии, равном h , т. е. $x_{\max, \min} = \pm h$.

Отмеченные выше особенности графиков магнитного поля над заряженным телом могут быть использованы для определения его планового положения и оценки глубины залегания верхней кромки.

В настоящее время применяют три способа изучения электромагнитного поля над заряженным телом.

Первый способ заключается в съемке эквипотенциальных линий над заряженным телом; он находит применение главным образом при разведке тел изомерной формы. При работе вторым способом измеряют градиент потенциала вдоль профилей, проходящих над заряженным телом. Этот способ используют главным образом для разведки вытянутых, крутопадающих тел жильного и пластового типов. Реже применяют измерение горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля.

§ 2. ПРОСЛЕЖИВАНИЕ ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАД ЗАРЯЖЕННЫМ ТЕЛОМ

Установка для прослеживания эквипотенциальных линий над заряженным телом состоит из питающей линии с источником тока и заземлениями, а также приемной или искательной цепи, включающей в себя щупы и индикатор нуля (рис. 119, а).

Конструкция заземления питающей цепи, расположенного непосредственно в заряжаемом теле, зависит от конкретных условий, в которых находится точка зарядки. В том случае, когда зарядку

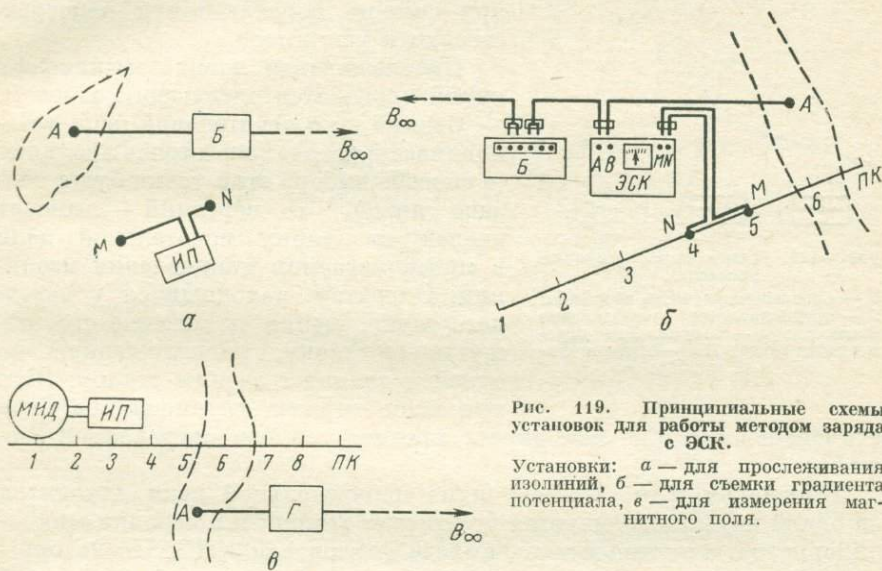


Рис. 119. Принципиальные схемы установок для работы методом заряда с ЭСК.

Установки: а — для прослеживания изолиний, б — для съемки градиента потенциала, в — для измерения магнитного поля.

производят в горных выработках и на дневной поверхности, для устройства заземлений рационально использовать обычные стержневые электроды. Если горная порода или руда в точке зарядки настолько плотна, что забить в нее электроды не представляется возможным, заземление осуществляют посредством войлока или пакли, пропитанных раствором какой-либо соли. При устройстве такого заземления на вертикальной стенке или кровле выработки его прижимают распорками. Для зарядки в скважинах используют скользящие электроды в виде пружинящих щеток, «фонарей», а в сухих скважинах — в виде кляпов из пакли, смоченной раствором соли.

Заземление в бесконечности относят на расстояние, в 10—15 раз превышающее линейные размеры площади, в пределах которой затем исследуется электрическое поле (см. гл. III). Заземление в бесконечности для уменьшения его сопротивления устраивают из нескольких штыревых электродов по возможности во влажном месте. Место заземления во избежание несчастных случаев ограждают флажками и снабжают предупредительной надписью.

Заземление в бесконечности соединяют с источником тока проводом ГПСМП, ГПСМПО или другой марки по возможности с малым сопротивлением. Чтобы снизить ошибки за счет утечек, питающую линию в пределах участка съемки устраивают из хорошего неизношенного провода.

В качестве источников тока применяют генераторы из комплекта ИКС-50 или ИКС-600. Эквипотенциальные линии целесообразно прослеживать при помощи искательной цепи, состоящей из двух электродов и измерительного прибора из комплекта ИКС (рис. 119, а).

В процессе полевых измерений вход измерителя ИКС подключают при помощи переключателя непосредственно к усилителю.

Прослеживание эквипотенциальных линий проводится следующим образом.

Задний щуп искательной цепи устанавливают в начальной точке изолинии (о способе выбора этой точки будет сказано ниже), а передний — выносят вперед на длину искательной цепи в предполагаемом направлении изолинии. Оператор, находящийся у переднего щупа, меняя положение его, нащупывает точку, расположенную на одной изолинии с задним щупом. Щуп при этом должен перемещаться, как

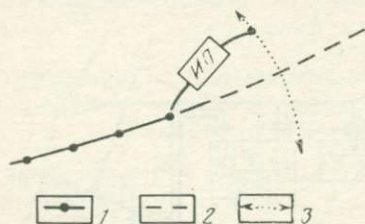


Рис. 120. Схема прослеживания изолинии.

1 — прослеженная часть изолинии; 2 — предполагаемое направление изолинии; 3 — направление перемещения щупа; ИИП — измерительный прибор.

это показано на рис. 120, вкrest предполагаемого направления изолинии.

Признаком того, что оба щупа измерительной цепи находятся на одной изолинии, является отсутствие отклонений стрелки микроамперметра, включенного на выходе измерителя ИКС. После определения положения точки прослеживаемой изолинии на месте этой точки ставят колышек с указанием номера изолинии и точки. Затем рабочий переносит задний щуп в найденную точку, а оператор снова выдвигает передний щуп на длину искательной цепи, и описанные выше операции повторяют. На искривленных участках прослеживаемых изолиний для более точного определения положения их шаг искательной цепи следует уменьшать.

Каждая искательная цепь обслуживается оператором и двумя рабочими, один из которых переносит задний щуп, а второй забивает и подносит колышки.

Одновременно на планшете может работать несколько искательных цепей, с каждой из которых прослеживаются изолинии на определенной части планшета.

Для перенесения найденных на местности точек изолиний на карту следует произвести топографическую съемку планшета. Методика топографической съемки может быть различной в зависимости от конкретных условий на участке съемки.

На карту изолиний наносят опорную сеть, геологические данные,

положение точки зарядки и подводящего провода, а также упрощенную ситуацию.

Пример карты изолиний над заряженным телом приведен на рис. 121.

Геологическое истолкование карты эквипотенциальных линий над заряженным телом обычно имеет качественный характер. В процессе интерпретации определяются примерное положение изучаемого

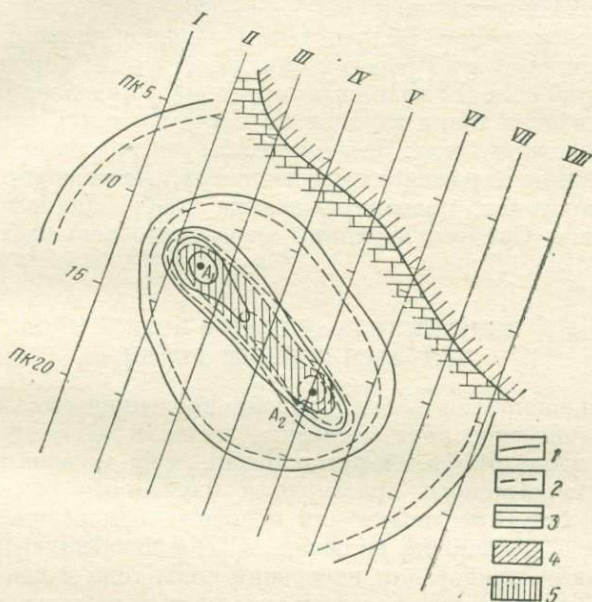


Рис. 121. Карта эквипотенциальных линий над заряженным сульфидным телом, расположенным вблизи контакта сланцев с известняками.

Изолинии, снятые при зарядке через электрод: 1 — в точке A_1 , 2 — в точке A_2 ; 3 — известняки; 4 — сланцы; 5 — сульфидное тело; I—VIII — профили.

объекта и его форма без указания на глубину и элементы залегания. Наиболее ответственным в процессе интерпретации карты является выбор той эквипотенциальной линии, которая по форме приближается к проекции заряженного тела на дневную поверхность.

Из теории электромагнитных полей известно, что нормальная компонента вектора плотности тока не терпит разрыва на границе двух сред с различным удельным сопротивлением, а следовательно, и на границе заряженного тела с вмещающими породами. Физически это означает, что весь ток, направленный перпендикулярно к поверхности раздела, поступает в окружающую среду. Поскольку удельное сопротивление заряженного тела меньше удельного сопротивления вмещающих пород и напряженность электрического поля согласно закону Ома $E = \rho j$, то непосредственно у границы заряженного тела с вмещающими породами напряженность поля резко возрастает.

На карте изолиний это проявляется в том, что у краев заряженного тела происходит сгущение эквипотенциальных линий. Для тел, вытянутых в каком-либо направлении, сгущение линий особенно резко проявляется у концов изучаемого объекта. Следует иметь в виду, что зона сгущения изолиний несколько смещена относительно контура тела (во внешнюю сторону), причем это смещение тем больше, чем глубже залегает тело.

На рис. 121 хорошо видна еще одна особенность карты изолиний над заряженным телом. Вблизи точки зарядки эквипотенциальные линии приближаются по форме к окружности, т. е. хорошо проводящее тело в этой области мало сказывается на форме изолиний. Вследствие этого вблизи точки зарядки по карте изолиний трудно судить о форме заряженного тела. Для того чтобы учесть влияние положения точки зарядки на характер карты изолиний, рекомендуется, если это возможно, проводить повторные съемки при различном положении точки зарядки. Системы изолиний желательно совмещать на одной карте (рис. 121).

§ 3. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАДИЕНТОВ ПОТЕНЦИАЛА НАД ЗАРЯЖЕННЫМ ТЕЛОМ

При зарядке крутопадающих хорошо проводящих тел постоянным током электрическое поле исследуют путем измерения градиентов потенциала вдоль профилей, расположенных на дневной поверхности вкрест предполагаемого простираения изучаемого объекта. Принципиальная схема установки для подобных измерений изображена на рис. 119, б. Установка включает в себя питающую и приемную линии, а также прибор для измерения силы тока в цепи питающих заземлений и разности потенциалов между приемными заземлениями. В качестве измерительного прибора служит автокомпенсатор либо потенциометр.

Монтажная схема установки показана на рис. 122.

Питающая линия состоит из двух заземлений *A* и *B*, соединяющих их проводов, источника тока и выключателя. Одно заземление располагают в прослеживаемом теле, а второе — относят в бесконечность. В качестве источников тока обычно применяют батареи 29-ГРМЦ-13 или 69-ГРМЦ-6. Сила тока в питающей цепи должна быть такой, чтобы обеспечивалось надежное измерение разности потенциалов между приемными заземлениями в пределах всей исследуемой площади. Число батарей, необходимое для исследования, рассчитывается так же, как для установки в методе сопротивлений (см. гл. III).

Выключатель тока вводят в разрыв питающей линии при помощи двойного провода, длину которого берут достаточной для того, чтобы прибор без перемещения всей питающей линии можно было устанавливать на любом профиле в пределах исследуемой площади. Один конец провода подключают к электроду, помещенному в тело, другой — к катушке с проводом, идущим к заземлению в бесконечности.

Приемная цепь состоит из двух заземлений M и N и проводов, соединяющих эти заземления с измерительным прибором. Длина проводов приемной цепи должна быть такой, чтобы при одном положении прибора можно было произвести измерения по крайней мере на одном-двух профилях.

Полярность всех соединений должна быть строго выдержана. Ошибка в полярности включения влечет за собой ошибку в знаке измеряемой разности потенциалов.

Полевые работы начинают с подготовки на исследуемой площади сети профилей. Для этого по предполагаемому простирающему прослеживаемого тела задают базисный профиль, проходящий непо-

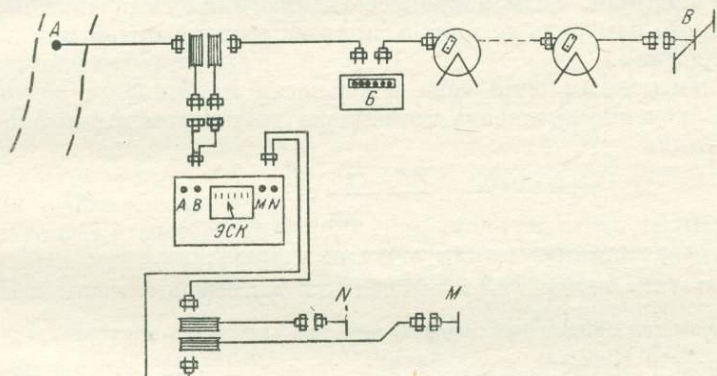


Рис. 122. Монтажная схема установки для работы методом заряда на постоянном токе с ЭСК.

средственно над точкой зарядки. Перпендикулярно к этому профилю через 20—40 м прокладывают поперечные профили, на которых пикетами отмечают точки стояния измерительных заземлений. Расстояние между пикетами и длина профилей зависят от глубины залегания верхней кромки заряженного тела и подбираются с таким расчетом, чтобы на графиках градиентов потенциалов достаточно четко отмечались экстремумы, а также точки пересечения графиков с осью расстояний.

Следующая операция состоит в подготовке питающей линии. Ее размеры выбираются такими же, как и при прослеживании эквипотенциальных линий.

Исследование электрического поля над заряженным телом заключается в измерении градиентов потенциала на дневной поверхности. С этой целью измерительные электроды заземляют на двух соседних пикетах профиля и измеряют между ними разность потенциалов. Если заземление M расположено впереди по ходу профиля относительно заземления N , измеренной разности потенциалов приписывают тот знак, на который указывает переключатель полярности прибора. В противном случае измеренную разность потенциалов записывают в журнал с обратным знаком.

Вслед за измерением ΔU измеряют силу тока в питающей цепи, причем этой величине приписывают положительный знак, так как при указанной выше полярности соединений положительный полюс батареи заземлен в заряженном теле. Нужно следить за тем, чтобы при перерывах в работе не была изменена полярность подключения батареи в питающую цепь.

После выполнения первого замера заземление M переносят в следующую точку профиля, а заземление N — в предыдущую точку стояния заземления M . При новом положении заземлений снова измеряют ΔU и I . Затем заземления переносят на следующий интервал, и в такой последовательности проводят наблюдения на каждом профиле. Если в процессе наблюдений сила тока остается постоянной, измерять ее можно лишь на каждой пятой или десятой точке профиля.

По измеренным силе тока и разности потенциалов вычисляют среднее значение градиента потенциала на каждом интервале точек наблюдения:

$$\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}},$$

где r_{MN} — расстояние между точками наблюдений.

Результаты измерений и вычислений записывают в журнал.

Журнал для записи наблюдений методом заряда на постоянном токе

Участок . . . Профиль . . . Азимут Дата
 Заземление A Заземление B_{∞} Начало наблюдений
 MN Шаг Конец наблюдений
 Батареи Погода

№ точки (пикета) стояния заземлений M и N	ΔU , мВ	I , мА	$\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}}$	Примечание
16	+19,4	38,8	+0,025	
17				

Оператор Вычислитель Проверил

Контроль за точностью съемки градиентов потенциала осуществляют путем повторных измерений на отдельных профилях. Средняя относительная погрешность повторных измерений не должна превышать 5%; при этом не учитываются погрешности замеров, которые меньше 0,5 мВ.

Для учета влияния положения точки зарядки на получаемые результаты, а также для установления электрической и геологической связи между телами, вскрытыми в различных горных выработках, рекомендуется съемку градиентов на исследуемой площади выполнять повторно при измененном положении точки зарядки.

В поле непосредственно после проведения измерений строят график зависимости градиента потенциала от положения точки измерения. Вертикальный масштаб на графиках выбирают с учетом интенсивности измеряемого поля. Обычно его принимают разным для различных профилей, так как величина градиента потенциала уменьшается с удалением профиля от точки зарядки.

Камеральная обработка результатов полевых наблюдений заключается в проверке и пересчете полевых журналов, построения графиков градиента потенциала (рис. 123) и карт графиков градиента потенциала.

Для того чтобы построить карту графиков градиента потенциала, на план в определенном масштабе наносят профили, вдоль которых были проведены наблюдения, и на этих профилях строят графики градиентов потенциала (рис. 124). Вертикальный масштаб на графиках выбирают, руководствуясь возможной наглядностью графиков и стремясь к тому, чтобы кривые на соседних профилях не пересекались, так как это делает карту трудночитаемой. В связи с этим имеет смысл увеличивать вертикальный масштаб по мере удаления профилей от точки зарядки.

Иногда по оси ординат вместо величины $\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}}$ откладывают величину $\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}} R$, где R — расстояние данного профиля от профиля, проходящего

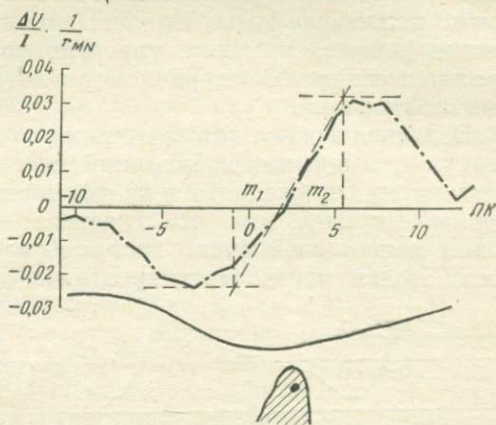
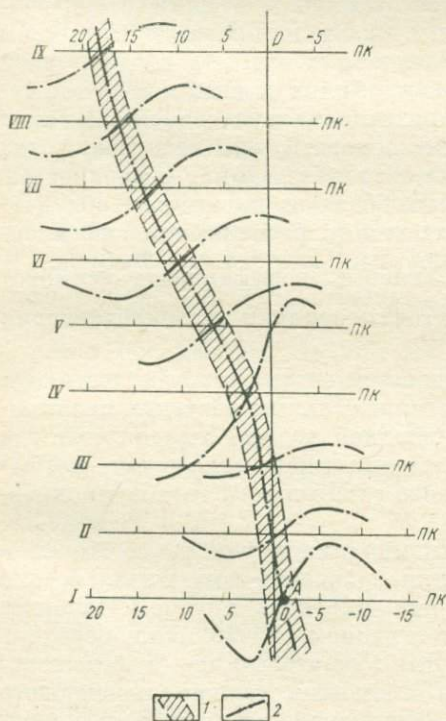


Рис. 123. График градиента потенциала над заряженным телом.



Иногда по оси ординат вместо величины $\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}}$ откладывают величину $\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}} R$, где R — расстояние данного профиля от профиля, проходящего

Рис. 124. Карта графиков градиента потенциала над заряженным телом.

1 — рудный пласт; 2 — графики градиента потенциала; I—IX — профили.

через точку зарядки. Множитель R компенсирует убывание градиента потенциала с удалением от точки зарядки. На карту наносят также положение точки зарядки и подводящих проводов, геологические данные, а также упрощенную ситуацию. Карта графиков является основным материалом при истолковании результатов полевых наблюдений.

Основная задача, которую приходится решать при интерпретации результатов полевых наблюдений, состоит в определении положения оси выхода заряженного тела под покровные отложения. При этом руководствуются тем, что градиент потенциала над заряженным телом меняет свой знак. Таким образом, линия, соединяющая на плане точки перехода градиента через нуль, является проекцией

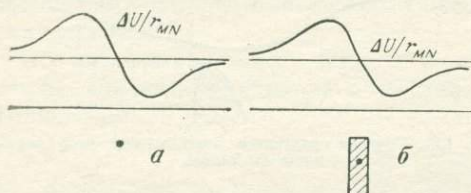


Рис. 125. Графики градиента потенциала.
 а — над точечным источником в однородной среде; б — над заряженным крутопадающим пластом.

оси выхода заряженного тела под наносы (на дневную поверхность). При этом следует иметь в виду, что графики градиента потенциала над точечным источником тока, помещенным на глубине h под дневной поверхностью в однородной среде, по внешнему виду очень сходны с такими же графиками над заряженным телом

(рис. 125). Основное отличие заключается в том, что в однородной среде расстояние между точками на профилях с максимальным и минимальными значениями градиента потенциала с удалением от точки зарядки быстро возрастает. Можно показать, что в случае, когда точечный источник тока расположен на глубине h под поверхностью однородной среды, точки, в которых градиент потенциала обладает максимальным и минимальными значениями, располагаются на гиперболах с полуосями $\frac{\sqrt{2}}{2}h$ и h . Угловые коэффициенты асимптот гиперболы не зависят от глубины точки зарядки и сопротивления среды и равняются $\sqrt{2}/2$.

На графиках, полученных над заряженным телом, расстояние между точками с максимальным и минимальным значениями потенциала зависит только от глубины верхней кромки тела, и, если эта глубина мало меняется, линии, соединяющие эти точки, параллельны друг другу и проекции выхода заряженного тела под покровные отложения.

Если работы методом заряда выполняются на участке со сложным геоэлектрическим разрезом, графики градиента потенциала весьма осложняются и экстремумы на них выделить трудно. Наиболее надежно выделяются на графиках в данном случае точки перехода градиента потенциала через нуль. Для того чтобы иметь возможность по положению этих точек судить о наличии хорошо проводящего тела и определить его положение, рекомендуется выполнять допол-

нительные измерения по нескольким профилям, ориентированным под углом $60-70^\circ$ к базисному профилю и соответственно к предполагаемому простиранию рудного тела (рис. 126). Если хорошо проводящее тело отсутствует, точки с нулевым значением градиента потенциала на таких профилях будут располагаться на прямой, проходящей через точку зарядки перпендикулярно к съемочным профилям. При наличии хорошо проводящего тела эти точки будут находиться над осью проводящего тела, и в общем случае соединяющая их линия пространственно не будет связана с направлением профилей.

Для определения положения концов вытянутого хорошо проводящего тела рекомендуется выполнять съемку градиентов потенциала вдоль профилей, проходящих через точки с нулевым значением градиента потенциала, т. е. вдоль намеченной оси заряженного тела. Как показано выше, у концов заряженного тела на графиках градиента потенциала наблюдаются экстремумы. Эти экстремумы несколько смещены относительно концов тела на расстояние тем большее, чем глубже располагается тело. С целью более точного определения положения концов заряженного тела разработаны способы, учитывающие это смещение.

Для приближенной оценки глубины залегания заряженного тела используют параметр m , равный проекции на ось расстояний отрезка касательной к графику градиента потенциала в точке перехода его через нуль, заключенного между осью расстояний и горизонтальной касательной к кривой потенциалов в одной из экстремальных точек (см. рис. 123).

Для тел изомерной формы глубина h до центра тела связана с параметром m следующим приближенным соотношением:

$$h \approx 2,6m.$$

Для тел, которые могут быть уподоблены горизонтальному цилиндру с изометрическим сечением,

$$h \approx 2,25m.$$

Для пластообразных залежей глубина до верхней кромки

$$h \approx 2,3m^{1,3}.$$

§ 4. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД ЗАРЯЖЕННЫМ ТЕЛОМ

При измерении магнитного поля над заряженным телом зарядку тела осуществляют низкочастотным переменным током, а само измерение поля выполняют при помощи приемной индукционной рамки и микровольтметра.

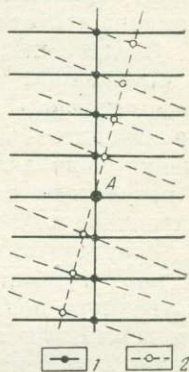


Рис. 126. Расположение профилей при работе методом заряда на постоянном токе. Профили: 1 — основные, 2 — косые.

Полевые измерения можно выполнять при помощи комплекта аппаратуры ИКС, снабженного магнито-индукционным датчиком (МИД) (см. рис. 119, *в*). С этой же целью можно применять микровольтметр ИМА (измеритель магнитной амплитуды), а также много-частотный генератор, предназначенные для работы низкочастотными индуктивными методами. Более детально эта аппаратура описана в гл. XIII. Магнитное поле измеряют вдоль профилей, ориентированных вкрест предполагаемого простирания заряженного тела. В каждой точке профиля измеряют вертикальную составляющую магнитного поля, горизонтальную составляющую вдоль профиля, а также угол наклона вектора H к горизонтальной плоскости.

Следует иметь в виду, что на магнитное поле токов, текущих в заряженном теле, накладывается магнитное поле токов, текущих во вмещающих породах, а также в проводах, при помощи которых производится зарядка изучаемого объекта. В связи с этим положение подводящих проводов фиксируют и в процессе обработки в результаты полевых наблюдений вводят поправки, учитывающие магнитное поле подводящих проводов.

Результаты полевых наблюдений изображают в виде графиков и карт графиков горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля. По этим графикам в соответствии со сведениями, приведенными в § 1 настоящей главы, определяют плановое положение заряженного тела и оценивают глубину его залегания.

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Метод заряда может быть применен при гидрогеологических исследованиях для определения направления и скорости движения подземных вод.

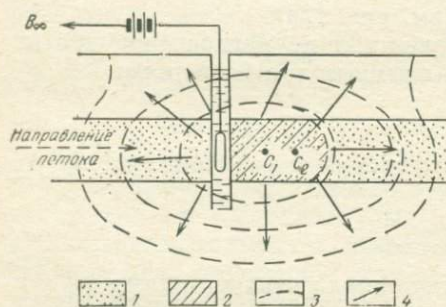


Рис. 127. Электрическое поле вокруг заряженного солевого ореола.

1 — водоносный горизонт; 2 — солевой ореол; 3 — эквипотенциальные линии; 4 — токовые линии.

Как известно, обычные способы решения указанной задачи требуют наличия нескольких буровых скважин, из которых одна служит для запуска индикатора, а остальные — для его улавливания. Методом заряда скорость и направление потока можно определить по одной скважине.

В скважину, вскрывшую водоносный горизонт, опускают в пористом мешке какую-либо хорошо растворимую соль — обычно поваренную соль или хлористый аммоний (рис. 127). Подземный поток, растворяя соль, будет выносить раствор в направлении своего движения. Поскольку солевой ореол вследствие высокой минерализации обладает хорошей

проводимостью, его распространение в водоносном горизонте может быть прослежено методом заряда. Для этого один из электродов питающей цепи опускают в скважину в водоносный горизонт, а второй — относят в бесконечность. На дневной поверхности изучают электрическое поле введенного в скважину электрода.

Перед зарядкой скважины солью производят съемку одной или нескольких эквипотенциальных линий, которые в случае, если скважина пробурена в относительно однородных в горизонтальном направлении породах, будут близки по форме к окружности с центром у устья скважины.

Если спустя некоторое время после зарядки скважины солью повторно заснять эквипотенциальные линии, то можно заметить, что форма их изменится — из окружностей они превратятся в овальные кривые, вытянутые в направлении движения подземных вод. Причина этого заключается в том, что эквипотенциальные поверхности вокруг заряженного солевого ореола по форме повторяют его, а центр эквипотенциальных линий на дневной поверхности является проекцией центра солевого ореола на эту поверхность.

Со временем размеры солевого ореола увеличиваются: передний край его движется со скоростью движения подземных вод, а задний остается вблизи скважины. Соответственно меняется положение центров C_1 , C_2 солевого ореола, а с ними — и центров эквипотенциальных линий. Нетрудно представить, что направление смещения этих центров совпадает с направлением движения подземных вод, но поскольку передний край ореола движется со скоростью потока, а задний край неподвижен, то скорость смещения центров изолиний равна половине скорости потока, т. е. $v_n = 2v_c$, где v_n — скорость потока; v_c — скорость смещения центров изолиний на дневной поверхности.

Величина v_c может быть определена по наблюдениям за перемещением эквипотенциальных линий на дневной поверхности.

Монтажная схема установки изображена на рис. 128. По существу она лишь в деталях отличается от описанной выше схемы установки для работы методом заряда на постоянном токе.

Электрод A , служащий для зарядки солевого ореола, конструктивно объединяют с приспособлением для зарядки скважины солью. Из пористого материала (например, из мешковины) изготавливают узкий мешок, диаметр которого меньше диаметра скважины на глубине водоносного горизонта, а длина 0,5—1 м. В этот мешок засыпают соль и помещают оголенную часть провода, идущего к устью скважины. Провод используют для подключения электрода A к одному из полюсов батареи, а также для спуска и подъема электрода. Мешок из пористой ткани защищен снаружи чехлом из плотного брезента. К нижнему концу электрода в случае необходимости прикрепляют груз, облегчающий спуск снаряда в скважину.

Заземление в бесконечности относят от скважины на расстояние, равное 10—15-кратной глубине до водоносного горизонта.

В качестве источника тока обычно используют батарею 69-ГРМЦ-13.

Приемная цепь состоит из двух измерительных заземлений M и N и проводов, соединяющих эти заземления с измерительным прибором (автокомпенсатором или потенциометром). Длину соединительных проводов берут такой, чтобы было можно проводить съемку изолиний при неизменном положении одного из заземлений приемной цепи.

Очень удобен для прослеживания изолиний комплект аппаратуры ИКС, так как при работе с ним отпадает необходимость компенсации поляризации измерительных электродов.

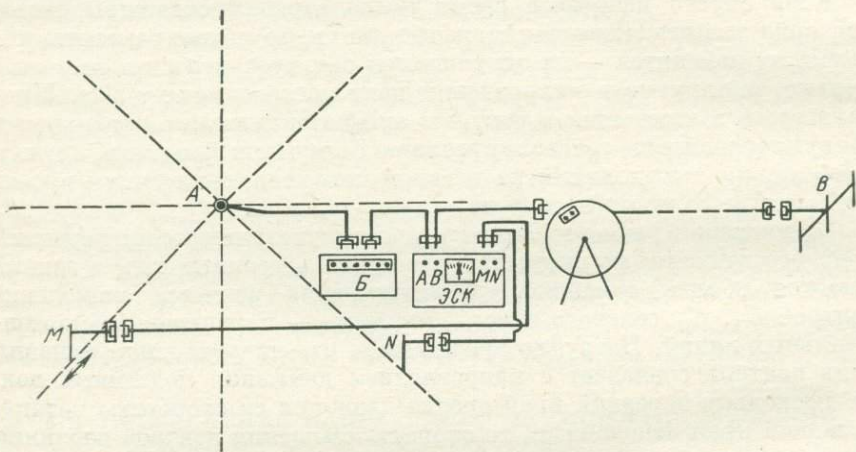


Рис. 128. Монтажная схема установки для изучения режима движения подземных вод методом заряда с ЭСК.

Опорная топографическая сеть представляет собой систему лучевых профилей с центром у устья скважины. Количество лучей в зависимости от требуемой детальности работ колеблется от четырех до восьми. Лучи размечают пикетами через 5—10 м, пикеты нумеруют.

Всю установку располагают таким образом, чтобы батареи и прибор находились у устья скважины.

Непосредственно после загрузки соли в скважину проводят съемку изолиний нормального поля. В случае необсаженной скважины радиус изолиний берут равным 1,5—2-кратной, а в случае обсаженной скважины — 2—3-кратной глубине залегания исследуемого водоносного горизонта.

Съемку изолиний выполняют следующим образом.

Одно из заземлений приемной цепи (обычно N) устанавливают на луче, направленном противоположно предполагаемому направлению потока, на расстоянии от устья скважины, равном принятому радиусу изолинии. Второе заземление помещают в различные точки соседнего луча; при каждом его положении на луче оператор следит затем, отклоняется ли стрелка гальванометра прибора при нажатии

на включатель тока. Отклонение стрелки свидетельствует о том, что между измерительными заземлениями имеется разность потенциалов, т. е. что они расположены на различных изолиниях. Задача оператора заключается в том, чтобы найти такое положение подвижного заземления, при котором стрелка гальванометра не реагирует на замыкание токовой цепи. В этом положении оба измерительных заземления находятся на одной и той же эквипотенциальной линии. После того как найдена точка изолинии на одном луче, подвижное измерительное заземление переносят на соседний луч и прослеживание изолинии продолжают аналогичным способом.

Топографическую съемку изолиний проводят одновременно с их прослеживанием путем измерения расстояний от устья скважины до точек изолинии на лучах. При этом используют имеющиеся на лучах пикеты, расстояние до которых и измеряют. Тут же в поле по измеренным расстояниям изолинии наносят на план.

Повторную съемку изолиний выполняют аналогичным образом. При этом точка стояния неподвижного заземления остается прежней. Промежутки времени между первой и последующими съемками изолиний должны быть тем больше, чем меньше скорость потока; они колеблются от единиц до десятков часов.

На рис. 129, а изображена система изолиний, полученных при повторных съемках с интервалом времени между съемками $\Delta_1 t$, $\Delta_2 t$, $\Delta_3 t$ и т. д. Если обозначить через $\Delta_1 r$, $\Delta_2 r$, $\Delta_3 r$ и т. д. смещения изолиний по лучу, направленному по потоку, то очевидно, смещение центров изолиний будет равно половине соответствующего смещения фронта изолинии. Таким образом, среднее значение скорости потока в промежутки времени между двумя наблюдениями определится следующими выражениями:

$$v_{1cp} = \Delta_1 r / \Delta_1 t, \quad v_{2cp} = \Delta_2 r / \Delta_2 t, \quad v_{3cp} = \Delta_3 r / \Delta_3 t \text{ и т. д.}$$

Опыт показывает, что в начальные моменты после помещения соли в скважину значение наблюдаемой скорости меньше истинного значения этой величины. Лишь по истечении некоторого времени,

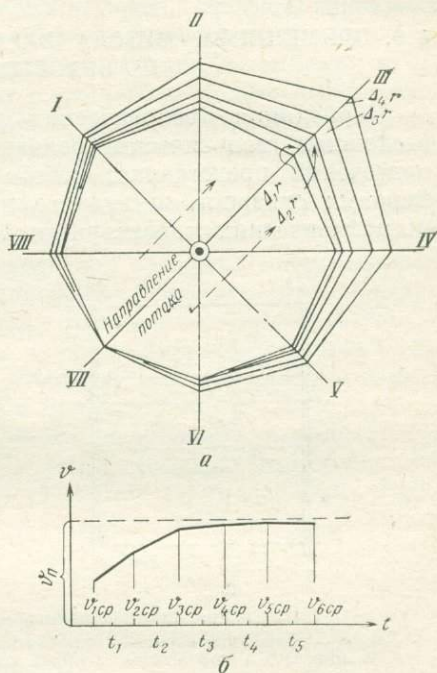


Рис. 129. Смещение изолиний при повторных съемках (а) и график зависимости расчетной скорости потока от времени, прошедшего с момента зарядки скважины солью (б).
I—VIII — профили.

в которое, очевидно, формируется солевой ореол, наблюдаемая скорость приближается к истинной. Отсюда вытекает следующий способ изображения результатов полевых наблюдений. По вычисленным для разных моментов скоростям потока строится график зависимости этой скорости от времени, прошедшего с момента помещения соли в скважину (рис. 129, б). Горизонтальный участок этого графика характеризует истинную скорость потока.

§ 6. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗАРЯДА ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИИ РАЗРЕЗОВ ПО БУРОВЫМ СКВАЖИНАМ

Корреляция геологических разрезов по буровым скважинам в сложных геологических условиях и особенно корреляция рудных подсечений представляет собой процесс, требующий густой сети буровых скважин, детального изучения литологических, а также петрофизических характеристик пород, пересекаемых скважинами.

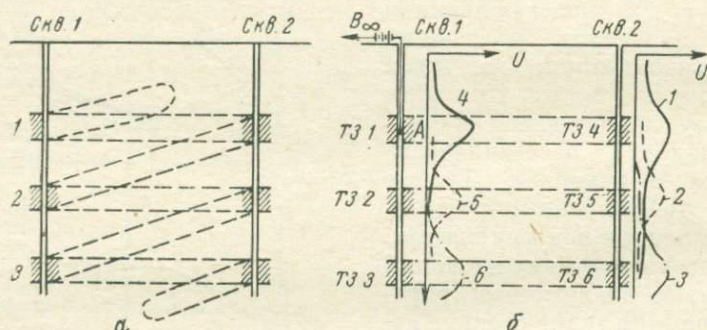


Рис. 130. Скважинный вариант метода заряда.

а — возможные варианты корреляции рудных подсечений в буровых скважинах; *б* — корреляция рудных подсечений с использованием данных метода заряда.

1—6 — рудные подсечения; ТЗ — точки заряда.

Степень достоверности построения геологических разрезов по совокупности разрезов по буровым скважинам может быть существенно повышена в том случае, если в разрезах участвуют хорошо проводящие руды или горные породы.

На рис. 130, *а* изображены разрезы по двум буровым скважинам, в которых имеются рудные подсечения. Пунктиром на рисунке показаны некоторые возможные варианты корреляции рудных подсечений и построения контуров рудных тел.

Для того чтобы из этих вариантов выбрать один, соответствующий истинному разрезу, поступают следующим образом. Одно из заземлений питающей линии (заземление *А* на рис. 130, *б*) устраивают в скважине непосредственно в рудном подсечении (подсечение *1* на рис. 130, *б*), а второе заземление — *В* относят в бесконечность. Поле заземления *А* изучают в скважинах, расположенных в окрестностях скважины с заземленным подсечением. С этой целью вдоль

скважин (в дальнейшем называемых измерительными) регистрируют распределение потенциала или градиента потенциала. Характерной особенностью графиков потенциала является наличие максимума против того рудного подсечения, которое имеет непосредственную электрическую связь с заряженным подсечением, т. е. принадлежит к одному с ним рудному телу. На графиках градиента потенциала в этом случае наблюдаются два экстремума противоположного знака по обе стороны от рудного подсечения и переход графика через нулевое значение непосредственно в районе рудного подсечения.

Завершив исследование поля при помещении заземления в подсечение *1*, заземление *B* переносят в следующее подсечение (подсечение *2* на рис. 130, б) и снова повторяют съемку поля в измерительных скважинах, выделяя таким образом в этих скважинах подсечения, непосредственно связанные с заряженным.

В том случае, когда рудное тело, вскрытое в одной из скважин, выклинивается в пространстве между скважиной с зарядом или измерительной скважинами, по характеру графиков потенциала или градиента потенциала можно приближенно оценить, на каком расстоянии от измерительной скважины произошло выклинивание.

Для повышения достоверности корреляции рекомендуется в процессе исследований менять роли скважин, т. е. скважину с зарядом использовать как измерительную и наоборот.

Результаты интерпретации принято изображать в виде корреляционной схемы. На ней отображают положение скважин с зарядом и измерительных скважин, точки зарядки, рудные подсечения (рис. 130, б).

МЕТОД ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

§ 1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Метод естественного электрического поля (сокращенно метод ЕП) основан на наблюдении электрических полей, создаваемых естественными электродвижущими силами электрохимического, фильтрационного и диффузионного происхождения.

Электрохимические поля. Электродвижущие силы электрохимической природы в геологической обстановке наблюдаются в тех случаях, когда среди пород, обладающих ионной проводимостью, залегают скопления хорошо проводящих минералов с электронной проводимостью — пирита, халькопирита, борнита, петландита, арсенипирита, магнетита и др. Такое рудное тело вместе с вмещающими породами образует естественный гальванический элемент. Механизм его возникновения и действия, исходя из электрохимических закономерностей, можно представить себе следующим образом.

На поверхности электронного проводника, помещаемого в ионно-проводящую среду, т. е. на границе фаз с разной по природе проводимостью, возникает двойной электрический слой. Он образуется за счет или перехода катионов металла из кристаллической решетки в раствор, или осаждения катионов на поверхности проводника, или же за счет избирательной адсорбции ионов одной фазы поверхностью другой фазы. Этот слой характеризуется скачком потенциала, величина и знак которого зависят от потенциал-определяющих факторов — свойств, состава и состояния проводника и вмещающей среды, участвующих в процессе образования двойного электрического слоя. Таким образом, электронный проводник по отношению к окружающей среде приобретает потенциал, который принято называть **электродным потенциалом**.

К основным потенциал-определяющим факторам относятся: а) химический состав подземных вод, циркулирующих в толще вмещающих пород и обмывающих рудное тело; б) минеральный состав и текстурно-структурные особенности рудных тел.

Действие этих факторов проявляется в зависимости от физико-геологических условий — удельного сопротивления пород и руд, скорости циркуляции подземных вод, взаимодействия их с породами и рудными минералами, за счет которого меняется состав вод, в первую очередь, их кислотность и содержание ионов сероводорода и железа.

Если бы величина и знак скачка потенциала двойного электрического слоя на всей поверхности проводника оставались постоянными, то это была бы замкнутая равномерно поляризованная поверхность, которая не создает в окружающей среде электрического поля. Необходимым условием возникновения поля во внешней среде является различие величины или знака скачка потенциала двойного электрического слоя на разных участках поляризованной поверхности.

В геологической среде обычно величина скачка потенциала на разных участках поляризованной поверхности различна. Применительно к поляризующимся рудным залежкам это означает, что потенциал-определяющие факторы должны быть разными для различных частей рудного тела. Это может быть следствием наличия либо зональности в распределении рудных минералов в рудной залежи, либо изменения химического состава подземных вод. В геологических условиях большее значение имеет второе следствие, связанное с уменьшением содержания кислорода с глубиной.

Совокупное влияние всех перечисленных факторов приводит к тому, что в природных условиях величина скачка потенциала двойного электрического слоя возрастает с глубиной. Таким образом, рудная залежь вместе с вмещающими породами образует гальванический элемент, у которого катод располагается в верхней части залежи, а анод — в нижней (рис. 131). Внутренней цепью элемента является само рудное тело, а внешней — толща вмещающих пород. Так как и породы, и особенно само рудное тело обладают хорошей электропроводностью, между электродами возникшего гальванического элемента потечет электрический ток, носителем которого во внутренней цепи будут свободные электроны, а во внешней — ионы.

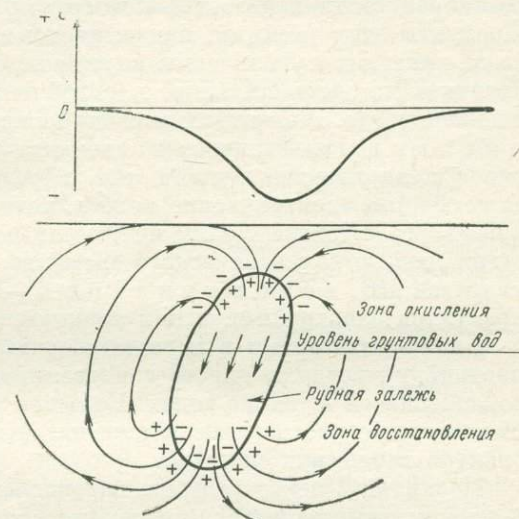


Рис. 131. Схема возникновения естественного поля над рудной залежью.

Известно, что ток во внешней цепи гальванического элемента зависит от э. д. с. элемента и полного сопротивления цепи. Полное сопротивление складывается из сопротивлений внутренней и внешней частей цепи. Применительно к поляризованной рудной залежи это означает, что поле вокруг нее будет тем интенсивнее, чем больше разнится величина скачка потенциала для различных частей залежи и чем меньше ее внутреннее сопротивление. Внутреннее сопротивление рассматриваемого природного элемента зависит от удельного сопротивления руды, а также от тех электрохимических реакций, которые происходят на контакте рудного тела и омывающих его растворов, если через этот контакт протекает электрический ток. Продукты этих реакций, накапливаясь в анодной и катодной областях, приводят к увеличению внутреннего сопротивления природного элемента и, соответственно, к ослаблению электрического поля во внешней среде. В электрохимии это явление носит название *поляризации* гальванического элемента (не следует путать это понятие с поляризацией рудных тел, в результате которой возникают естественные электрические поля и которая рассматривается в данной главе). В связи с этим неперенным условием постоянства действия любого гальванического элемента, в том числе и природного, является его *деполяризация* — уничтожение или удаление продуктов электрохимических реакций.

Деполяризаторами в первую очередь являются кислород, поступающий из воздуха вместе с подземными водами, и ионы железа, содержащиеся в тех же водах. Большое значение для деполяризации имеют также растворение и перенос подземными водами продуктов электрохимических реакций.

Поскольку некоторые из перечисленных факторов (например, режим подземных вод) со временем меняются, то изменяется и зависящее от них естественное поле. Эти изменения происходят, однако, крайне медленно. Повторные наблюдения естественных полей над некоторыми колчеданными линзами Урала и Кавказа, выполненные через несколько лет, показали, что за это время поле практически не изменилось.

Интенсивность естественных полей, наблюдаемых над сульфидными телами на разных месторождениях, колеблется в широких пределах — от первых десятков до нескольких сотен милливольт.

Естественные электрические поля отмечаются также над пластами антрацита, графита, углистых сланцев и графитизированных пород, также обладающих электронной проводимостью. Однако в ионной среде они ведут себя как инертные электроды, потому что имеют прочную кристаллическую решетку и в ионной среде не отдают катионов. Возникновение естественных полей в этом случае связывают с образованием двойных электрических слоев за счет адсорбции графитом или антрацитом ионов из подземных вод. Наблюдаемые при этом отрицательные аномалии достигают часто сотен милливольт.

Фильтрационные поля. Естественные электрические поля возникают также вследствие фильтрации подземных вод в пористых породах. Практически эти поля можно отмечать всюду, так как фильтрационные процессы происходят повсеместно. Но обычно электродвижущие силы фильтрации незначительны и электрические поля, связанные с ними, слабы. Лишь в отдельных случаях, например при выходе под наносы напорных вод из подземного источника или при интенсивном дренаже грунтовых вод в пересеченной местности, электрические поля фильтрационного происхождения настолько усиливаются, что наблюдения над ними позволяют решать некоторые гидрогеологические и инженерно-геологические задачи. При наблюдениях же естественных полей, связанных с рудными телами, фильтрационные поля, накладываясь на них, становятся своеобразной помехой.

Представим себе отдельный капилляр, по которому вследствие разницы гидростатического давления на входе и выходе в направлении, указанном на рис. 132, протекает электролит. Благодаря адсорбции стенками капилляра ионов одного знака (обычно анионов, имеющих больший ионный радиус), на границе раствора и твердого вещества стенки образуются двойной электрический слой, внешняя (неподвижная) обкладка которого состоит из адсорбированных отрицательных ионов, а внутренняя (положительная) — в свою очередь состоит из двух частей: неподвижной, связанной электростатическим притяжением с отрицательной обкладкой, и подвижной, диффузорно-распределенной по поперечному сечению капилляра. В результате из капилляра выносятся положительные ионы больше, чем отрицательных, и поэтому у выхода из капилляра накапливаются положительные заряды, а у входа в него возникает относительный избыток отрицательных зарядов. Между концом *B* и началом *A* капилляра возникает разность потенциалов, пропорциональная перепаду гидростатического давления и зависящая также от электрических констант жидкости. Величина ее может быть подсчитана по формуле

$$\Delta U = \zeta \epsilon r \rho / 4 \pi \eta,$$

где ζ — разность потенциалов между обкладками двойного слоя; ϵ — диэлектрическая постоянная жидкости; r — разность давлений между концами капилляра; ρ — удельное сопротивление жидкости; η — вязкость жидкости.

Вывод этой формулы дается в курсах физической химии.

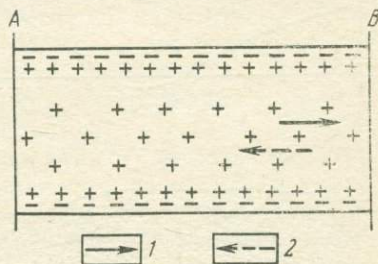


Рис. 132. Двойной электрический слой в капилляре.

Направление: 1 — течения жидкости, 2 — электрического тока.

Разность потенциалов между концами капилляра создает электрический ток, направленный против течения жидкости и препятствующий накоплению зарядов у конца капилляра.

Поры горной породы можно рассматривать как сложную систему капилляров, в каждом из которых происходит процесс, аналогичный описанному выше. При фильтрации растворов через пористый пласт электрокинетические разности потенциалов, возникающие в каждом отдельно взятом капилляре, складываются в общее электрическое поле, охватывающее как водоносный, так и вмещающие его пласты.

Поскольку горные породы обладают большей или меньшей проводимостью, под воздействием электрического поля в области циркуляции подземных вод возникают электрические токи.

На рис. 133 схематически показано распределение токов в фильтрующем водоносном пласте и около него.

Диффузионные поля.

Естественные поля создаются также в результате процессов диффузии, происходящих на контактах пород, содержащих в порах растворы или одной и той же соли в разных

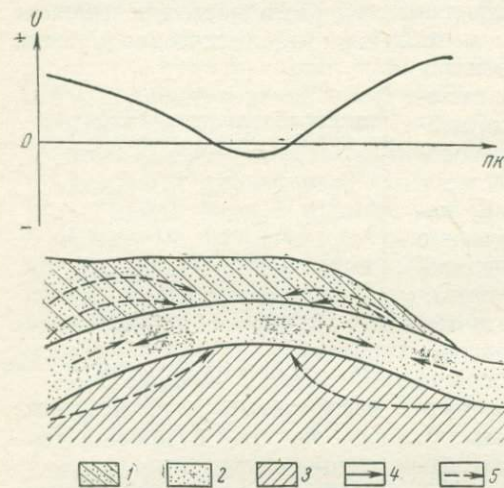


Рис. 133. Токи фильтрации в водоносном пласте. 1 — суглинки; 2 — пески; 3 — глины; 4 — направление фильтрации; 5 — токовые линии.

концентрациях, или растворы разных солей. В первом случае вследствие того, что подвижности ионов разного знака в электролите различны, в процессе выравнивания концентраций более подвижные ионы опережают менее подвижные и по одну сторону контакта происходит накапливание ионов преимущественно одного знака, а по другую — противоположного. Во втором случае в процессе диффузии также происходит отделение ионов более подвижных от ионов менее подвижных и соответственное накапливание разноименных зарядов по разные стороны границы соприкосновения растворов. Перераспределение ионов и ведет к возникновению электрического поля. Разность потенциалов, возникающая при диффузии, может быть выражена формулой

$$\Delta U = \frac{u-v}{u+v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_2}{C_1},$$

где u и v — подвижности катионов и анионов; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; F — число Фарадея; C_1 и C_2 — концентрации растворов; n — валентность ионов.

Электрические поля диффузионного происхождения для методов полевой электроразведки большого значения не имеют, так как отчетливо наблюдать их практически можно только при исследовании буровых скважин методами электрического каротажа.

Меняющиеся во времени поля. Некоторыми исследователями (А. С. Семенов и др.) были обнаружены поля с отчетливыми вариациями во времени. Эти поля имеют суточный ход с максимумом в утренние часы и минимумом во второй половине дня. Амплитуда суточных изменений достигает 200—300 мВ, при этом может меняться знак потенциала. Установлена связь полей с температурой почвы: с ростом температуры потенциал понижается; температурный градиент потенциала достигает десятков милливольт на 1° .

Меняющиеся во времени поля наблюдаются на открытых участках, где мощность почвы не превышает 10—20 см и отсутствует растительность. Установлена приуроченность аномальных зон к участкам развития кварцитов, а также к зонам окварцевания и других гидротермальных изменений пород. Наоборот, над рыхлыми песчано-глинистыми и сильно обводненными породами указанные поля не отмечаются. Такая приуроченность меняющихся со временем полей дает основание использовать их для геологического картирования и выделения зон окварцевания и гидротермальных изменений пород.

Природа меняющихся со временем полей выяснена недостаточно. Вероятно, их возникновение связано с перемещением уровня капиллярного поднятия почвенной влаги и пленочной воды под влиянием атмосферных факторов (главным образом, температуры).

§ 2. ПОЛЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ТЕЛ ПРОСТЕЙШЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Задача о распределении на поверхности земли потенциалов, создаваемых поляризованными телами, в настоящее время решена только для геометрически простых тел — сферы, эллипсоида, цилиндра, прямоугольного пласта (призмы). К ним в самом первом приближении могут быть приравнены рудные залежи в предположении о том, что скачок потенциала на контакте рудная залежь — вмещающая порода (э. д. с. двойного электрического слоя) подчиняется простому математическому закону.

Пусть в однородной безграничной среде с удельной проводимостью γ_1 помещена сфера радиусом r_0 и удельной проводимостью γ_2 , на поверхности которой вследствие указанных выше причин образовался двойной электрический слой. Предположим, что создаваемая этим слоем э. д. с. \mathcal{E} распределена по поверхности сферы по закону

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \theta + C \quad (\text{VII.1})$$

где C постоянная величина, причем $C > \mathcal{E}_0$.

В этом случае качественно распределение величины скачка потенциала будет соответствовать рис. 131. Учитывая, что двойной электрический слой с постоянной величиной скачка потенциала C

не создает во внешней среде электрического поля, расчет поля можно вести, исходя из предположения, что

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \theta. \quad (\text{VII.1}')$$

Такому предположению отвечает рис. 134, а. В этом случае на верхней и нижней частях поляризованной сферы, т. е. при $\theta = 0$ и $\theta = 180^\circ$, наблюдается максимальный скачок потенциала, в ее экваториальной плоскости, для которой $\theta = 90^\circ$, скачок потенциала равен нулю.

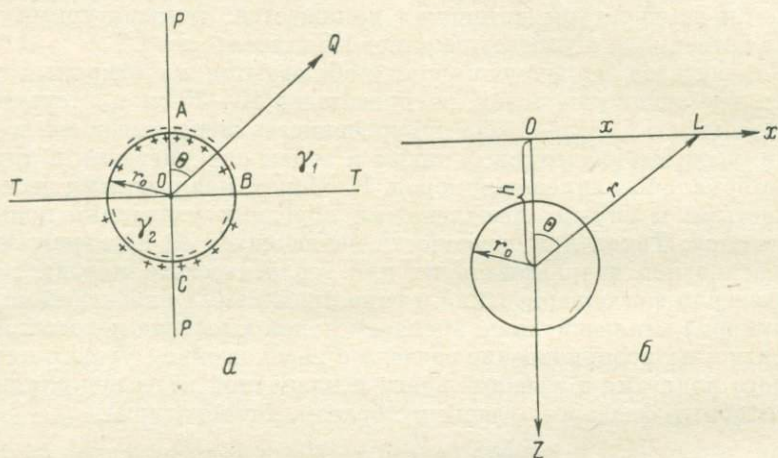


Рис. 134. Пояснение к расчету поля вертикально поляризованной сферы. Сферы: а — в безграничной проводящей среде, б — в проводящем полупространстве.

Проведем через точки А и С с максимальным абсолютным значением э. д. с. ось поляризации сферы PP , а саму сферу будем считать поляризованной вертикально.

Для упрощения решения примем, что сфера обладает совершенной проводимостью, т. е. $\gamma_2 = \infty$. Тогда в ней не происходит падения потенциала. Учитывая, что при переходе через поверхность сферы будет отмечаться скачок потенциала ΔU , равный значению э. д. с., потенциал на поверхности сферы

$$U = \mathcal{E}_0 \cos \theta. \quad (\text{VII.2})$$

Поместим в центр O сферы вертикально ориентированный диполь. Его потенциал на расстоянии r_0 , т. е. на поверхности сферы, согласно выражению (II.6), будет

$$U_d = P \cos \theta / r_0^2, \quad (\text{VII.3})$$

где P — момент диполя.

Сравнивая формулы (VII.2) и (VII.3), можно заключить, что потенциал поляризованной сферы на ее поверхности тождествен

потенциалу диполя, помещенного в центре сферы и обладающего моментом $\mathbf{P} = \mathcal{E}_0 r_0^2$.

Потенциал диполя в любой точке среды на расстоянии r от центра диполя определяется выражением

$$U_d = P \cos \theta / r^2.$$

Поскольку в частном случае при $r = r_0$ это выражение удовлетворяет распределению потенциалов на поверхности сферы радиусом r_0 , то и во всем внешнем по отношению к сфере пространстве, т. е. при $r > r_0$, поле диполя будет совпадать с полем поляризованной сферы. Следовательно, поле поляризованной сферы может быть выражено следующим образом:

$$U = \mathcal{E}_0 r_0^2 \cos \theta / r^2. \quad (\text{VII.4})$$

Выше мы рассматривали внешнюю среду безграничной. Но в действительности поля поляризованных тел мы наблюдаем на дневной поверхности, поэтому, как было показано в § 2 гл. II, влияние поверхности раздела земля — воздух может быть учтено путем введения в выражение (VII.4) множителя 2, т. е.

$$U = 2\mathcal{E}_0 r_0^2 \cos \theta / r^2. \quad (\text{VII.5})$$

Проследим изменение потенциала вдоль профиля, проходящего через эпицентр сферы точку O — проекцию центра сферы на дневную поверхность (рис. 134, б).

Введем систему прямоугольных координат с началом в точке O ; ось x направим по профилю. Глубину залегания центра сферы обозначим через h . В произвольной точке L на оси x потенциал

$$U = 2\mathcal{E}_0 r_0^2 \frac{\cos \theta}{r^2} = 2\mathcal{E}_0 r_0^2 \frac{h}{\sqrt{h^2 + x^2}} \frac{1}{(h^2 + x^2)} = 2\mathcal{E}_0 r_0^2 \frac{h}{(h^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (\text{VII.6})$$

Нетрудно убедиться в том, что в начале координат при $x = 0$ потенциал достигает наибольшего по абсолютной величине значения

$$|U_{\max}| = |2\mathcal{E}_0 r_0^2 / h^2|. \quad (\text{VII.7})$$

Поскольку в верхней части сферы в соответствии с рис. 134, а $\mathcal{E} = -\mathcal{E}_0$, потенциал в эпицентре имеет минимальное значение. Функция (VII.6) симметрична относительно переменной x , и ее график показан на рис. 135 (кривая 1) — потенциал по абсолютной величине убывает симметрично в обе стороны от эпицентра.

Вследствие того, что контактная э. д. с. распределяется относительно оси поляризации симметрично, графики U по любому профилю, проходящему через эпицентр под произвольным углом к оси x , будут сходны с описанным выше. В связи с этим карта эквипотенциальных линий поля вертикально поляризованной сферы представляет собой систему концентрических окружностей с центром, лежащим над центром сферы.

При наклонном положении оси поляризации сферы распределение потенциалов на поверхности земли становится асимметричным.

В частности, для угла наклона $\alpha = 45^\circ$ на графике потенциала наблюдается максимум (рис. 135, кривая 3), амплитуда которого составляет примерно $1/7$ амплитуды минимума. На карте эквипотенциальных линий соответственно появляется область положительных значений потенциала. Отрицательный экстремум смещается от эпицентра в сторону восстания оси поляризации. Для горизонтально поляризованной сферы (геологически маловероятный случай) график потенциала представлен кривой 2 (рис. 135).

Аналогично может быть решена задача для других тел простой формы. В частности, для

кругового горизонтально расположенного цилиндра с вертикальной плоскостью поляризации, показанного на рис. 136, а, потенциал определяется выражением

$$U = 2\mathcal{E}_0 r_0 \cos \theta / r = 2\mathcal{E}_0 r_0 h / (h^2 + x^2). \quad (\text{VII.8})$$

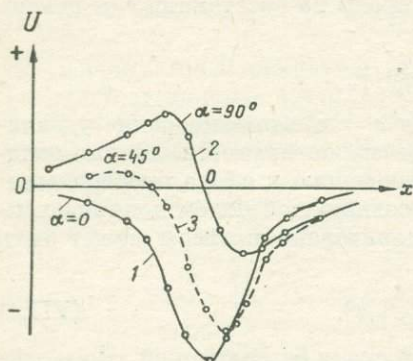


Рис. 135. Графики потенциала над поляризованной сферой.

1 — при вертикальной поляризации ($\alpha = 0$); 2 — при горизонтальной поляризации ($\alpha = 90^\circ$); 3 — при наклонной оси поляризации ($\alpha = 45^\circ$).

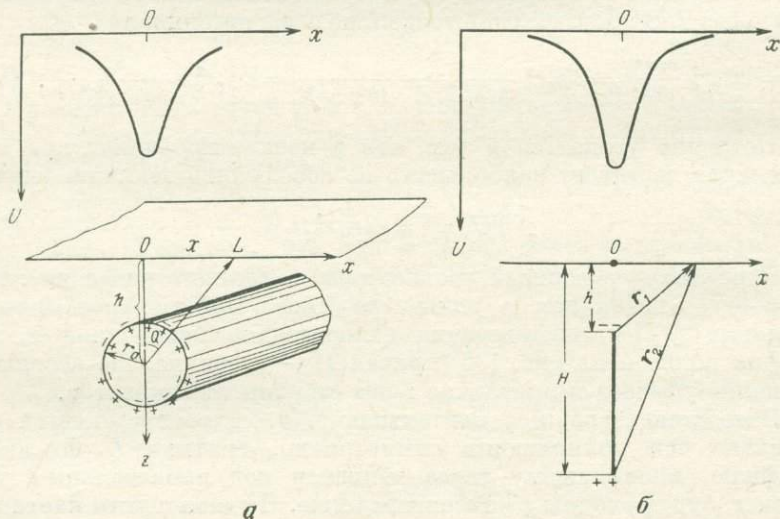


Рис. 136. Пояснение к расчету полей поляризованных тел.

а — горизонтальный цилиндр с вертикальной плоскостью поляризации; б — вертикальный поляризованный пласт.

На том же рисунке изображен график потенциала вдоль профиля, проходящего вкрест простирания цилиндра.

На карте эквипотенциальные линии в этом случае будут изображаться системой прямых, параллельных друг другу и проекции оси цилиндра на дневную поверхность. Изолиния с минимальным значением потенциала пройдет над осью цилиндра.

Потенциал поляризованного вертикального тонкого пласта (рис. 136, б) выражается формулой

$$U = 2\lambda \ln \frac{r_1}{r_2} = 2\lambda \ln \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{\sqrt{x^2 + H^2}}, \quad (\text{VII.9})$$

где λ — плотность распределения зарядов на верхней и нижней границе пласта; h и H — глубины их залегания.

График потенциала такого пласта по линии, перпендикулярной к его плоскости, показан на том же рисунке.

В большинстве случаев наблюдаемые графики естественного поля имеют форму, близкую к кривой 1 (см. рис. 135), так как рудные тела преимущественно поляризованы в вертикальном или близком к нему направлениях. Изолинии на экспериментальных картах обычно образуют более или менее вытянутые замкнутые фигуры, мало похожие на правильные геометрические кривые, что свидетельствует о том, что в природе поляризованные рудные тела не имеют правильной формы.

Однако, несмотря на отличие полей природных поляризованных тел от полей тел правильной формы, анализ последних позволяет наметить пути решения обратной задачи. Очевидно, что по положению минимумов потенциала на графиках и картах можно определить местонахождение тела. Конфигурация изолиний на карте отражает форму тела, и чем протяженнее тело в горизонтальном направлении, тем более вытянутую форму имеют и изолинии на карте. Наконец, как это можно заключить из формул (VII.6)—(VII.9), имеется возможность, пользуясь результатами решения прямых задач, оценить размеры и глубину залегания поляризованных тел по наблюдаемому на поверхности земли естественному полю.

§ 3. АППАРАТУРА ДЛЯ СЪЕМКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ

Измерительная установка для работы методом естественного поля изображена на рис. 137. Она состоит из измерительного прибора ИП (автокомпенсатор ЭСК; может быть использован потенциометр ЭП-1), измерительных заземлений M и N и соединяющих их проводов. В качестве заземлений применяются электроды особой конструкции, называемые неполяризующимися. Обычные металлические электроды в данном случае не используют вследствие их большой поляризации. При наблюдении естественных электрических полей с металлическими электродами мы измеряли бы каждый раз разность потенциалов естественного поля, искаженную на величину

разности электродных потенциалов. Эта величина часто соизмерима с наблюдаемыми разностями потенциалов естественного поля и к тому же меняется от замера к замеру.

Применить компенсатор поляризации для устранения этой помехи принципиально невозможно, так как поляризация накладывается на измеряемую разность потенциалов естественного поля, и разделить их в измерительной установке нельзя. В связи с этим исключить поляризацию электродов из результатов измерений естественного поля удастся иным путем, а именно, посредством применения неполяризующихся электродов. Конструкция их основана на том, что контакт металлического стержня электрода с почвой

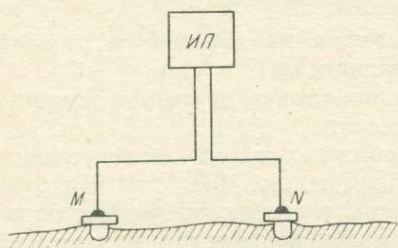


Рис. 137. Принципиальная схема измерительной установки для съемки естественного поля.

осуществляется не непосредственно, а через раствор соли того же металла, из которого сделан электрод, причем концентрация раствора в обоих электродах измерительной установки поддерживается одинаковой. Благодаря этому электродный потенциал остается в течение измерений постоянным и близким по значению для обоих электродов. В этом случае общая поляризация двух электродов, как разность их электродных потенциалов,

будет близка к нулю и, что наиболее важно, весьма постоянна во времени. Диффузионные же э. д. с., возникающие при соприкосновении раствора соли с почвенными растворами, незначительны и большого влияния на измерения не оказывают.

В практике электроразведки наибольшее применение получили медные и свинцовые неполяризующиеся электроды.

Конструкция и внешний вид наиболее распространенного неполяризующегося электрода системы ВИРГ изображены на рис. 138, а, б. Корпус 1 электрода изготовлен из пористой керамики и в верхней части глазурован. В корпус ввинчена глазурованная керамическая или пластмассовая пробка 2, внутри которой имеется отверстие для медного стержня 3 с гнездом в верхней части для присоединения электрода к измерительной цепи. Медный стержень изготовлен из электролитической меди и укреплен в пробке при помощи химически неактивной замазки. Внутренняя полость электрода наполнена насыщенным раствором медного купороса.

Поляризация электродов в процессе работы несколько изменяется в основном за счет проникновения внутрь электрода ионов из почвенных растворов. В этом случае электрод тщательно промывают дистиллированной водой и заливают свежим раствором медного купороса.

Измерение разности потенциалов естественного поля установкой с неполяризующимися электродами проводится следующим образом. Допустим, что естественные потенциалы в точках 1 и 2 (рис. 139)

равны соответственно U_1 и U_2 , а контактные э. д. с. электродов — e_1 и e_2 . Присоединим электроды к клеммам M и N измерительного прибора и измерим разность потенциалов между точками I и 2 (рис. 139, а). Первый замер будет равен:

$$\Delta U_1 = U_M - U_N = (U_1 + e_1) - (U_2 + e_2) = (U_1 - U_2) + (e_1 - e_2) = \Delta U + P,$$

где $\Delta U = U_1 - U_2$ — искомая разность потенциалов естественного поля; $P = (e_1 - e_2)$ — поляризация электродов (разность их электродных потенциалов).

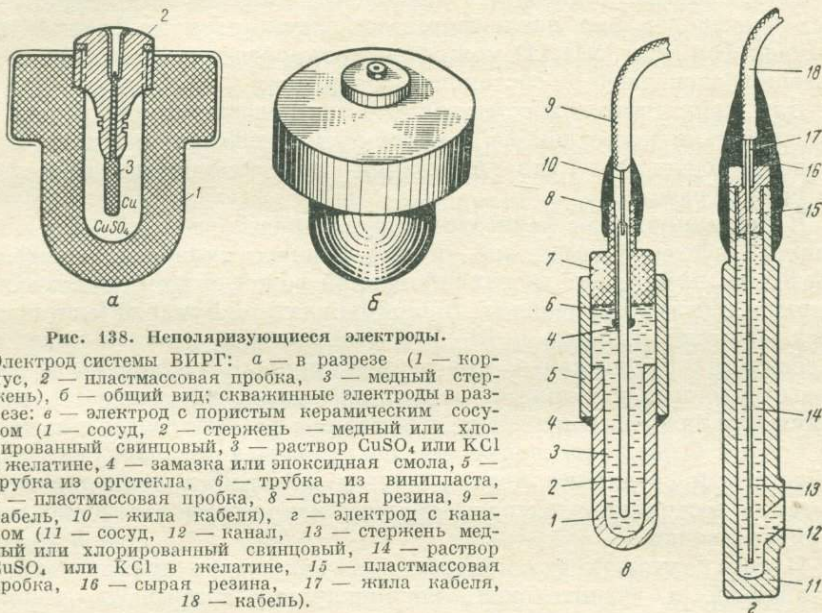


Рис. 138. Неполаризующиеся электроды.

Электрод системы ВИРГ: а — в разрезе (1 — корпус, 2 — пластмассовая пробка, 3 — медный стержень), б — общий вид; скважинные электроды в разрезе: в — электрод с пористым керамическим сосудом (1 — сосуд, 2 — стержень — медный или хлорированный свинцовый, 3 — раствор CuSO_4 или KCl в желатине, 4 — замазка или эпоксидная смола, 5 — трубка из оргстекла, 6 — трубка из винилпласта, 7 — пластмассовая пробка, 8 — сырая резина, 9 — кабель, 10 — жила кабеля), г — электрод с каналом (11 — сосуд, 12 — канал, 13 — стержень медный или хлорированный свинцовый, 14 — раствор CuSO_4 или KCl в желатине, 15 — пластмассовая пробка, 16 — сырая резина, 17 — жила кабеля, 18 — кабель).

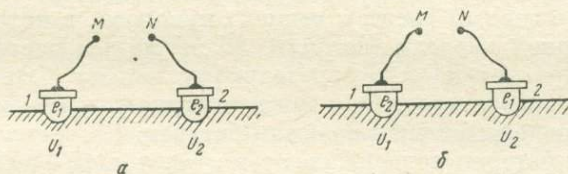


Рис. 139. Измерение разности потенциалов естественного поля при помощи неполаризующихся электродов.

Поменяем электроды местами (рис. 139, б) и снова измерим разность потенциалов между теми же точками:

$$\Delta U_2 = U'_M - U'_N = (U_1 + e_2) - (U_2 + e_1) = (U_1 - U_2) - (e_1 - e_2) = \Delta U - P;$$

отсюда искомая разность потенциалов естественного поля

$$\Delta U = (\Delta U_1 + \Delta U_2)/2, \quad (\text{VII.10})$$

а поляризация измерительных электродов

$$P = (\Delta U_1 - \Delta U_2)/2. \quad (\text{VII.11})$$

При равенстве контактных э. д. с. электродов e_1 и e_2 замеры ΔU_1 и ΔU_2 были бы равны между собой, а поляризация $P = 0$.

Если разность потенциалов имеет знак плюс, т. е. $U_1 > U_2$, то естественный ток течет от точки 1 к точке 2, и, наоборот, если вычисленная величина ΔU отрицательна, то естественный ток течет в направлении от точки 2 к точке 1.

Таким образом, благодаря постоянству поляризации измерительных электродов она исключается из результатов измерений; при помощи формулы (VII.11) можно контролировать постоянство поляризации, зависящей от состояния электродов.

Для работы методом естественного тока следует иметь комплект, состоящий не менее чем из четырех-пяти неполяризующихся электродов. Электроды для измерений подготавливают за сутки до начала работ.

В стеклянном или фаянсовом сосуде готовят 3—4 л насыщенного раствора химически чистого медного купороса, электроды тщательно промывают дистиллированной водой, а их металлические стержни или трубки очищают тонкой наждачной бумагой (еще лучше после очистки промыть в 10—15%-ном растворе азотной кислоты). В сосуды кладут несколько кристаллов купороса и заливают доверху приготовленным раствором. Остальной раствор переливают в фаянсовую или пластмассовую кювету и ставят в нее электроды так, чтобы их сосуды были почти полностью погружены в раствор. Электроды нумеруют и соединяют друг с другом короткими проводничками. В таком состоянии электроды должны находиться в течение всего периода съемки.

В том случае, когда поляризация электродов оказывается неустойчивой и значительной, рекомендуется покрывать стержни электродов слоем электролитической меди. Для этого стержни опускают в насыщенный раствор медного купороса, в который следует добавить серной кислоты (не более 30 см³ на 1 л раствора), и подключают параллельно к отрицательному полюсу батареи. В центральную часть электролизной ванны помещают кусок меди и соединяют его с положительным полюсом батареи. Во время электролиза напряжение батареи поддерживают в пределах 15—30 В, а разрядный ток устанавливают таким, чтобы на каждый электрод приходилось не менее 0,1 А. Через каждые 5—10 мин нужно поворачивать стержни для более равномерного покрытия медью.

По истечении 1—2 ч электролиз прекращают и измеряют потенциометром разности потенциалов между каждой парой стержней (не вынимая их из сосуда с купоросом). Если разности потенциалов превышают первые десятые доли милливольт, электролиз повторяют.

При работе с ЭСК на концы проводов измерительной линии надевают двухштыревую вилку и включают ее в гнезда «МН» прибора. Проверяют питание прибора, переводя переключатель «питание —

контроль» последовательно в положения H_1, H_2, H_3, A , а затем ставят на индекс «вкл.». Тумблер «КП» переводят в положение «выкл.», выключая тем самым компенсатор поляризации. Переключатель «пределы» ставят на индекс «100».

Поставив переключатель рода работ « $\Delta U - I$ » в положение ΔU , на вход прибора подают измеряемую разность потенциалов, а переключателем полярности « $M+ -$ » добиваются, чтобы стрелка гальванометра отклонялась вправо. Затем изменяют пределы измерений таким образом, чтобы стрелка находилась в пределах правой половины шкалы, и снимают отсчет. Знак измеряемой разности потенциалов определяется положением переключателя полярности.

При работе с потенциометром используется только основная измерительная часть прибора.

Правила пользования потенциометром при измерении разности потенциалов естественного поля таковы. После того как установка собрана и провода от электродов подключены к клеммам M и N прибора, замыкают цепь компенсационного элемента, дезарретируют гальванометр и ставят ручки декадных магазинов на нули. Затем замыкают ключом измерительную цепь и определяют направление отклонения стрелки гальванометра. Если стрелка отклонилась вправо, то осуществляют компенсацию по обычным правилам; если же стрелка отклонилась влево, то сначала поворачивают переключатель в компенсационной цепи потенциометра. Знак измеряемой величины ΔU определяется положением переключателя: если потенциал на клемме M больше, чем на клемме N , то переключатель показывает «плюс», при обратном соотношении потенциалов — «минус». Эти знаки отвечают соотношению потенциалов точек земли, на которых стоят электроды, присоединенные соответственно к клеммам M и N .

Перед каждым переключением декадников ключ измерительной линии размыкается. После окончания замера для сохранения компенсационного элемента его цепь размыкается.

§ 4. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Точки наблюдений при съемке естественных полей располагают на определенных интервалах вдоль системы обычно параллельных профилей. Лишь иногда исследование поля проводят по отдельным маршрутам. Сеть наблюдений подготавливается перед началом съемки.

Съемка естественного поля заключается в измерении в определенной последовательности разностей потенциалов между точками наблюдений. Задавшись некоторым условным значением потенциала на начальной точке, по измеренным значениям ΔU вычисляют потенциалы всех остальных точек и получают картину распределения потенциалов вдоль отдельных профилей и на всей площади съемки.

Процесс полевых работ начинается с подготовки участка съемки.

Подготовка участка съемки. Участок для съемки естественного поля выбирают на основании геологических сведений о данном районе.

По середине выбранной площади в направлении предполагаемого простирания искомым объектов прокладывают магистраль, по обе стороны от которой и перпендикулярно к ней провешивают профили. На них при помощи мерной ленты через равные промежутки размечают точки наблюдений. Точки отмечают колышками, на которых пишут номера профиля и точки. Профили нумеруют римскими цифрами, точки — арабскими. Нулевые точки профилей располагают на магистрали; точки, идущие в одну сторону от нее, отмечают знаком плюс, в другую — знаком минус. При небольшой длине профилей магистраль может быть проложена и по одной из сторон участка.

Точки магистрали и концевые точки профилей (а также точки их излома, если таковые имеются) закрепляют столбами и привязывают к существующей в районе триангуляционной сети.

Сеть наблюдений, как и для других методов, определяется масштабом и задачей съемки, размерами объекта и создаваемой им аномалии, а в данном случае — также и интенсивностью естественного поля. Профили располагают вкрест наиболее вероятного простирания объекта, а при изучении процессов движения подземных вод — вдоль вероятного направления течения грунтовых потоков.

Полевые работы. Наблюдения естественного поля можно проводить двумя способами: съемкой градиентов и съемкой потенциала. В производственных условиях применяется в основном съемка потенциала. Съемкой градиентов пользуются лишь при наличии сильных помех за счет блуждающих токов, при маршрутных работах и детальных съемках.

Ежедневно перед выходом на полевые работы из имеющихся неполяризующихся электродов выбирают пару с наименьшей поляризацией. Для этого электроды попарно в разных комбинациях устанавливают один возле другого в лунки во влажной земле, затем многократно измеряют величину поляризации с перестановкой электродов. Можно также выполнять измерения, оставляя электроды в общем сосуде с медным купоросом. Из промеренных пар выбирают ту, у которой поляризация не превышает 1—2 мВ.

В процессе полевых измерений для заземления электродов у колышков небольшой лопаткой (саперной) вырывают лунки глубиной 5—8 см. Электрод ставят в лунку и присыпают с боков землей, но так, чтобы он касался почвы только пористым сосудом. Необходимо следить также за тем, чтобы стержень электрода не прикасался к растительности. Во время работы температура электродов должна быть по возможности одинаковой, поэтому их следует предохранять от прямых солнечных лучей, а при перерывах наблюдений ставить в общую лунку и соединять проводником.

Если съемка проводится на участке с сухой почвой, то из-за большого сопротивления заземления и, следовательно, низкой чувствительности измерительной линии измерения становятся неточ-

ными. В этом случае землю у кольшкков на местах установки электродов необходимо предварительно полить водой или слабым раствором медного купороса. Поливка должна быть проведена не менее чем за час до начала работы, чтобы э. д. с. фильтрации, возникающие при просачивании в почву воды или раствора, не исказили результатов измерений.

В конце дня электроды отмывают от налипшей на них земли, доливают купоросом, устанавливают в сосуд с раствором медного купороса или во влажную землю, политую купоросом, и соединяют

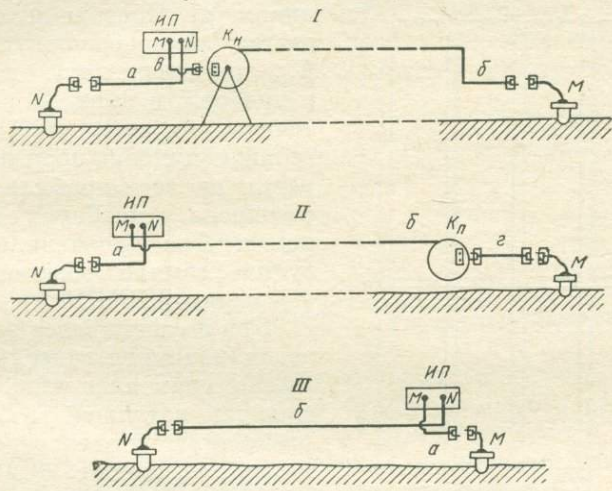


Рис. 140. Монтажные схемы установок для исследования естественного поля.

Способы: I — потенциалов с неподвижной катушкой К_н, II — потенциалов с подвижной катушкой К_п, III — градиентов; ИП — измерительный прибор.

между собой проводником. При длительных перерывах в работе (более 4—5 дней) для предохранения сосудов от растрескивания их промывают в чистой воде и оставляют в ней на сутки, после чего просушивают.

Способ съёмки потенциала. При работе этим способом измерения проводят с перемещением только одного переднего электрода, подключаемого к клемме М потенциометра или автокомпенсатора. Второй электрод присоединяют к клемме N и оставляют неподвижным на одной точке. Перемещая электрод М последовательно по всем точкам наблюдений, измеряют каждый раз разность потенциалов между подвижным и неподвижным электродами. Если потенциал точки стояния неподвижного электрода принять за нуль, то измеряемые разности потенциалов будут соответствовать потенциалам точек наблюдений относительно точки стояния электрода N (нулевой точки). Это позволяет значительно повысить производительность наблюдений, а также упростить обработку наблюдений. Нужно только помнить, что при работе этим способом поляризация входит

в измеряемые разности потенциалов всегда с одним знаком, в связи с чем в процессе съемки необходимо особенно тщательно следить за состоянием электродов и величиной их поляризации. Изменение величины поляризации за время работы не должно превышать 5 мВ на 1 км профиля.

Монтажная схема установки для съемки этим способом показана на рис. 140, I. Автокомпенсатор (или потенциометр) устанавливают на все время измерений около нулевой точки и соединяют с неподвижным электродом N проводником a .

Проводник b наматывается на неподвижную катушку K_n , расположенную на стойке у прибора, и имеет длину, достаточную для того, чтобы с одной стоянки прибора произвести измерения на всем профиле. Катушка соединена с прибором проводником v . Для проводников используется обычно облегченный провод марки ГПСМПО.

При наличии более легких проводов (например, саперный провод) можно применять установку с подвижной катушкой K_n , которую располагают у электрода M . Катушку соединяют с электродом проводником g и переносят вместе с ним (рис. 140, II). Для этого обычно употребляют переносную катушку, применяемую для прокладки полевых линий связи.

В соответствии с примерной схемой сети наблюдений, изображенной на рис. 141, полевую работу проводят в следующем порядке.

Электрод N устанавливают в точке I/0; рядом располагают измерительный прибор и катушку с проводом. Электрод M ставят на точку I/1 и производят подключения по схеме, приведенной на рис. 140, I или 140, II. Затем оператор измеряет разность потенциалов между электродами M и N и, после того как вычислитель запишет результат в журнал, отключает прибор от катушки и подает команду к перемещению электрода M на следующую точку. Рабочий переставляет электрод M на точку I/2, подтягивая за собой провод. Оператор подключает прибор к катушке и проводит следующее измерение. Затем электрод вновь переставляют и т. д. Поскольку передний электрод всегда подключен к клемме M прибора, знак ΔU соответствует показанию переключателя прибора.

После окончания замеров на первой половине профиля провод сматывают и в том же порядке проводят съемку на второй половине

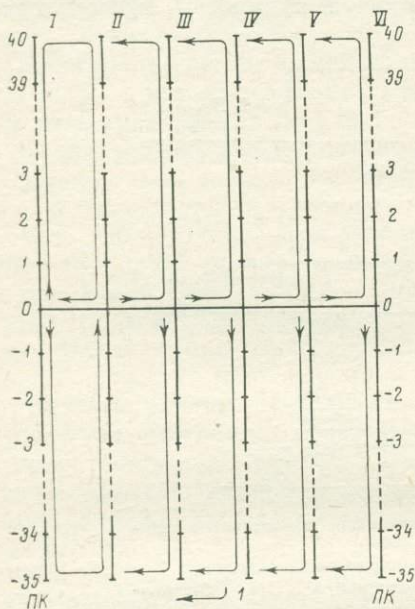


Рис. 141. Примерная схема сети наблюдений при съемке естественного поля.
I — направление ходов; I—VI профили.

Прибор устанавливают у одного из электродов, а клемму M прибора соединяют с ближайшим электродом коротким проводником a длиной 1,5—2 м. Второй электрод соединяют с клеммой N проводником b , длина которого определяется расстоянием между точками наблюдений. В процессе работы всю установку перемещают по профилю. В качестве примера рассмотрим последовательность съемки для сети профилей, изображенной на рис. 141.

Измерения ведут в следующем порядке (рис. 142). Измерительный прибор устанавливают у точки $I/ + 1$ (первая точка первого профиля), электроды ставят на точках $I/0$ и $I/ + 1$. Задний электрод (на точке $I/0$) при помощи длинного проводника присоединяют к клемме N прибора, а передний (на точке $I/ + 1$) — при помощи короткого проводника — к клемме M ; затем измеряют разность

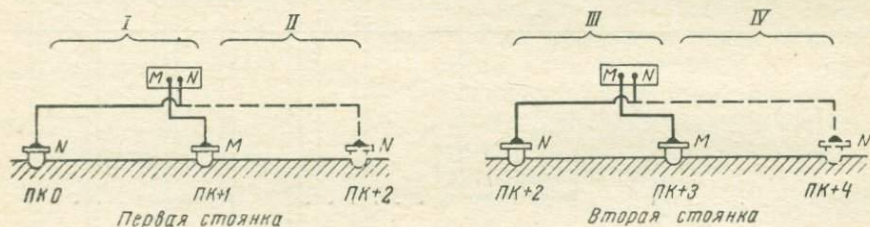


Рис. 142. Последовательность измерений при съемке градиентов потенциала на смежных стоянках.

$I-IV$ — первый — четвертый замеры.

потенциалов. Поскольку передний по направлению перемещения установки электрод присоединен к клемме M , знак измеренной величины ΔU соответствует показанию переключателя прибора. Затем рабочие по команде оператора переносят электроды на следующий интервал. При этом можно либо переставлять одновременно оба электрода (передний электрод с точки $I/ + 1$ на точку $I/ + 2$, задний с точки $I/0$ на точку $I/ + 1$) так, что один и тот же электрод всегда будет впереди, либо переносить только один задний электрод через два интервала (с точки $I/0$ на точку $I/ + 2$).

Первый способ менее удобен, так как в этом случае поляризация электродов будет входить во все измерения с одним знаком и вносить, таким образом, систематическую ошибку. При втором способе поляризация входит в замеры то с одним знаком, то с другим и при суммировании замеров по контуру при вычислении потенциалов не скажется на конечном результате. В связи с этим в первом случае необходимо систематически определять поляризацию и вводить при обработке поправку на нее, во втором — достаточно только следить за постоянством поляризации, производя контрольные измерения ее лишь через пять — десять точек. Второй способ перемещения электродов более удобен.

Применяя этот способ, прибор при перестановке электродов на следующий интервал с целью экономии времени оставляют на

прежней стоянке, а длинный проводник перебрасывают вперед к переднему электроду на точке $I/ + 2$. Но тогда передний электрод оказывается подключенным к клемме N , а задний — к клемме M . Не теряя времени на переключение проводников, измеряют разность потенциалов и знак ее меняют на обратный.

Записав результаты измерений, прибор переносят через два интервала на вторую стоянку к точке $I/ + 3$. С этой стоянки измеряют разности потенциалов между точками $I/ + 2$ и $I/ + 3$, а затем между точками $I/ + 3$ и $I/ + 4$. Снова переносят прибор через два интервала на точку $I/ + 5$ и т. д.

Наблюдения записывают в журнал следующей формы.

Журнал для записи наблюдений способом градиентов

Участок Профиль Азимут Дата
 Шаг Начало наблюдений
 Конец наблюдений
 Погода

№ точки (пикета)	ΔU , мВ	P , мВ	ε	$\Delta U'$, мВ	U , мВ	Примечание
1	2	3	4	5	6	7
0	+3,5	+0,4	-0,1	+3,4	100	
1	+10,0	+0,5	-0,2	+9,8	103,4	
2					113,2	

Оператор Вычислитель Проверил

В процессе полевых наблюдений заполняют графы 1—3, 7; остальные графы заполняют при обработке наблюдений. В графу 2 заносят значения разности потенциалов, причем, поскольку разность потенциалов измеряют между точками, запись ведут в интервале строк между соответствующими номерами точек наблюдений. В графу 3 записывают значение поляризации.

Дойдя до конца первого профиля, измеряют разность потенциалов между крайними точками профилей I и II. Если при этом расстояние между профилями больше длины измерительной установки, то выбирают несколько (или одну) промежуточных точек, которые служат только для связи наблюдений между профилями. Измерив разности потенциалов между промежуточными точками и между крайней из них и конечной точками профиля II, исследуют этот профиль в обратном направлении и точку II/0 тем же способом привязывают к начальной точке измерений I/0.

К заснятому таким образом контуру привязывают наблюдения по остальным профилям. Для этого проводят измерения по ходу,

образованному вторыми половинами профилей I и II, привязав их к точкам I/0 и II/0. При наблюдениях по остальным профилям начальную и конечную точки каждого профиля привязывают к конечным точкам предыдущего профиля через промежуточные точки.

При съемке слабых полей, особенно при наличии значительных помех за счет блуждающих токов, наблюдения целесообразно проводить с повторными измерениями на каждом интервале. В этом случае после измерения разности потенциалов между смежными точками следует менять электроды местами и измерять разность потенциалов на том же интервале вторично. Наблюдения записывают по следующей форме.

Журнал для записи наблюдений с повторением

№ точки (пикета)	ΔU_1 , мВ	ΔU_2 , мВ	ΔU , мВ	P , мВ	ε	$\Delta U'$, мВ	U , мВ	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	+6,3	+7,1	+6,7	0,4	+0,3	+7,0	100	
+1							107,0	
	+4,4	+3,8	+4,1	0,3	+0,3	+4,4		
+2							111,4	

Оператор Вычислитель Проверил

В графу 2 записывают первый замер разности потенциалов, в графу 3 — второй замер. Искомую разность потенциалов и поляризации определяют по формулам (VII.10), (VII.11) и заносят в графы 4 и 5. Графы 6, 7 и 8 заполняют при обработке наблюдений.

Измерения естественных полей в скважинах. Измерения естественных полей в скважинах, называемые иногда скважинными вариантом метода ЕП, позволяют изучать поле на глубине, а тем самым придают поисково-разведочным работам объемный характер, помогая выявлять и проследивать рудные тела в окрестностях и между скважинами. В этом заключается отличие скважинного метода ЕП от каротажа скважин методом ПС, который применяется с целью выявления узколокальных аномалий при детальном изучении геологического разреза по скважине.

В скважинном варианте метода ЕП все измерения в скважинах и на поверхности земли увязывают между собой для получения единой карты электрического поля.

Наблюдения в скважинах, как и при наземной съемке, заключаются в измерении разностей потенциалов и последующем вычислении относительных потенциалов. Наиболее удобным для измерений является способ потенциалов, при котором по скважине перемещают

только один электрод, а второй оставляют неподвижным на поверхности вблизи устья скважины.

Неполяризующиеся электроды в скважине в течение значительного времени подвергаются воздействию буровой промывочной жидкости, поэтому чтобы исключить вымывание и разбавление раствора, находящегося в электроде, сосуды электродов изготовляют из малопористых материалов; в некоторых конструкциях сосуд имеет узкий канал, соединяющий полость электрода с внешней средой. Раствор купороса (или KCl у свинцовых электродов) приготавливают на желатине (см. рис. 138, в, г).

Для скважинных измерений используют каротажные лебедки с кабелем. Измерения при непрерывной регистрации ведут с каротажной аппаратурой¹, при точечных наблюдениях — с автокомпенсатором ЭСК.

Наблюдения начинают с измерения поляризации электродов. С этой целью закрепленный на кабеле подвижный электрод устанавливают рядом с неподвижным на почве или в сосуде с раствором купороса (или KCl). Подвижный электрод опускают в скважину на некоторую фиксированную глубину — на 10—15 м ниже башмака обсадной трубы — и измеряют начальный потенциал в контрольной точке. Затем проводят измерения по стволу скважины. Более удобна точечная регистрация, для которой шаг перемещения электрода по скважине выбирают в пределах от 3 до 10 м. По достижении забоя кабель быстро сматывают и проводят повторный замер потенциала в контрольной точке, а затем снова измеряют поляризацию электродов.

Возможна и иная методика наблюдений, когда после контрольного измерения на фиксированной глубине электрод опускают на забой и измерения ведут при подъеме кабеля.

В условиях сильных помех от блуждающих токов применяют способ градиента; для этого к кабелю присоединяют два скважинных электрода — каждый к отдельной жиле, и при измерениях используют точечную регистрацию с шагом, равным разнесу измерительных электродов. Для исключения погрешностей измерения выполняют дважды — при спуске и подъеме кабеля.

Окончив измерения в скважинах, потенциалы точек стояния неподвижных электродов увязывают наземным ходом друг с другом и с начальной точкой наземной съемки.

При любом способе съемки естественного поля ежедневно перед началом работы проверяют состояние компенсационного элемента потенциометра и результаты проверки записывают в примечании. У автокомпенсатора проверяют напряжение источников питания, работу усилителя, градуировку шкал.

Помимо повторных измерений на каждой пятой-десятой точке, о которых говорилось выше, выполняют специальные контрольные

¹ Устройство и техника работы с каротажной аппаратурой рассматриваются в курсе «Геофизические методы исследований в скважинах».

наблюдения. Их проводят на профилях, резко различающихся по характеру поля от смежных, на участках и в скважинах со значительными расхождениями основных и повторных наблюдений, а также на аномальных зонах. При этом измерения в зонах локальных положительных аномалий повторяют 2—3 раза в разных метеорологических условиях или в разное время дня, а в аномальных зонах минимумов — по двум-трем профилям.

В зависимости от характера полей и воспроизводимости результатов наблюдений контрольные измерения составляют 5—30% общего объема работ.

§ 5. ОБРАБОТКА И ИЗОБРАЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Способ обработки результатов наблюдений зависит от методики полевых работ.

Обработка при работе способом съемки потенциала. Обработка наблюдений начинается с определения средней абсолютной погрешности по участку съемки. Для этого вычисляют абсолютные погрешности отдельных измерений по разности основных и повторных измерений, проведенных на каждой пятой или десятой точке профиля. Среднее арифметическое из абсолютных погрешностей отдельных измерений и является средней абсолютной погрешностью. Она не должна превышать 5 мВ. При этом абсолютные погрешности на отдельных точках не должны более чем втрое превышать среднюю абсолютную погрешность по участку.

В случае обнаружения меняющихся во времени полей (до 30 мВ и более в сутки) они должны быть подтверждены неоднократными повторными наблюдениями. При расчете погрешностей участки таких аномалий исключают. Все значения абсолютной погрешности (с указанием номеров точек) и среднее значение погрешности по участку записывают в конце журнала.

Перед вычислением потенциалов точек наблюдений для окончательной увязки профилей по данным прямого и обратного увязочного ходов вычисляют средние значения разностей потенциалов между нулевыми точками профилей, которые записывают в полевой журнал также во вторую графу против точек 0 соответствующих профилей. Расхождение этих значений с замеренными ранее при переходе с профиля на профиль не должно превышать трехкратной величины средней абсолютной погрешности. По данным увязочного хода вычисляют потенциалы нулевых точек всех профилей по отношению к начальной точке съемки 1/0 и записывают их в графу 4 журнала.

Затем вычисляют потенциалы точек наблюдений по каждому профилю. Для первого профиля эта операция сводится к переносу значений потенциалов графы 2 в графу 4, поскольку нулевая точка этого профиля является общим нулем всего планшета. По остальным профилям значения потенциалов, измеренные по отношению к нулевой точке данного профиля, алгебраически увеличивают на величину потенциала этой точки, вычисленного относительно общего нуля.

Обработка при работе способом съемки градиентов. Обработку вычислений начинают с нахождения невязки наблюдений по опорному контуру.

Для этого подсчитывают суммы положительных $\Sigma (+\Delta U)$ и отрицательных $\Sigma (-\Delta U)$ разностей потенциалов и вычисляют невязку по формуле

$$m = \Sigma (+\Delta U) + \Sigma (-\Delta U). \quad (\text{VII.12})$$

Результаты подсчетов записывают в конце журнала наблюдений.

О качестве полевых измерений судят по величине ошибки p , выраженной в процентах:

$$p = \frac{|m|}{\Sigma |\Delta U|} \cdot 100\%, \quad (\text{VII.13})$$

где $|m|$ — абсолютная величина невязки; $\Sigma |\Delta U|$ — сумма абсолютных значений измеренных по опорному контуру разностей потенциалов.

Наблюдения считаются удовлетворительными, если ошибка не превышает 5%. В противном случае их бракуют и наблюдения проводят заново. Значение p записывают в полевой журнал.

Невязку разбрасывают равными долями с обратным знаком по всем измеренным разностям потенциалов ΔU . Поправку за невязку вычисляют с округлением до первого десятичного знака по формуле

$$\varepsilon = -m/n,$$

где m — невязка; n — число замеров в контуре.

Затем вычисляют и заносят в журнал исправленные значения разностей потенциалов $\Delta U'$, определяемые по формуле

$$\Delta U' = \Delta U + \varepsilon.$$

После этого находят потенциалы всех точек контура относительно начальной точки 1/0, потенциал которой условно выбирают таким, чтобы значения U_i всех остальных точек были положительными. Потенциал каждой последующей точки равен потенциалу предыдущей, суммированному с исправленной разностью потенциалов между этими же точками:

$$U_i = U_{i-1} + (\Delta U')_i^{i-1}.$$

Значение потенциалов заносят в предпоследнюю графу журнала.

Если съемка велась таким образом, что при перемещении установки по профилю впереди оказывался всегда один и тот же электрод, то при обработке наблюдений в измеренные значения разности потенциалов необходимо вносить поправку за поляризацию и лишь после этого определять невязку и вычислять потенциалы. В этом случае в журнал после графы 3 нужно ввести дополнительную графу.

Обработка наблюдений по профилям (ходам), опирающимся на начальную и конечную точками на контур или другой профиль

с известными значениями потенциала, проводится по той же схеме. Лишь невязка вычисляется по другой формуле:

$$m = [\sum (+\Delta U) + \sum (-\Delta U)] + (U_n - U_k); \quad (\text{VII.14})$$

здесь U_n и U_k — соответственно потенциалы начальной и конечной точек хода, являющихся точками предыдущего профиля (или контура), к которым привязаны наблюдения по данному профилю; в квадратных скобках даны суммы положительных и отрицательных значений разностей потенциалов по данному ходу.

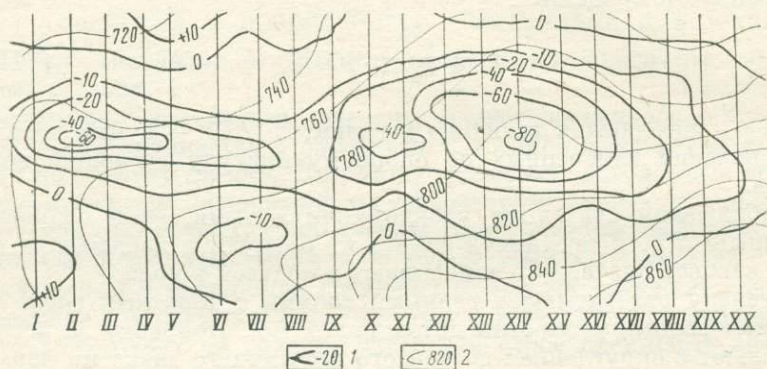


Рис. 143. Карта эквипотенциальных линий естественного поля на сульфидном месторождении.

1 — изолинии естественного поля; 2 — горизонталы; I—XX — профили.

Невязку разбрасывают по измеренным значениям разностей потенциалов обрабатываемого хода и затем вычисляют потенциалы его точек относительно потенциала начальной точки.

Изображение результатов наблюдений. Результаты съемки естественных полей изображают в виде карт эквипотенциальных линий, графиков потенциала и карт графиков потенциала.

Для построения карт эквипотенциальных линий естественного поля на план наносят точки наблюдения, записывают около них значения потенциалов и в полученном поле чисел проводят эквипотенциальные линии. Сечение эквипотенциальных линий зависит от интенсивности наблюдаемого поля. Желательно, чтобы изолинии наиболее четко отображали особенности распределения потенциалов на участке съемки (рис. 143).

Для построения графика потенциалов на ось абсцисс наносят точки наблюдений, а по оси ординат откладывают значения потенциала в соответствующих точках. Горизонтальный масштаб должен соответствовать масштабу отчетной карты, а вертикальный — обеспечивать возможность четкого анализа графика. График строят в виде ломаной линии. Под графиком вычерчивают рельеф дневной поверхности, геологический разрез и изображают данные последующей интерпретации геофизических наблюдений (рис. 144).

Для удобства сопоставления данных по отдельным профилям составляют карту графиков. С этой целью на план наносят все профили и по каждому профилю на плане строят график потенциала.

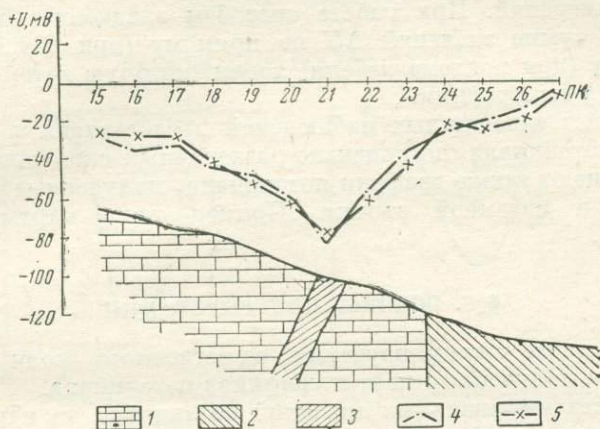


Рис. 144. Графики потенциала естественного поля над полиметаллической жилой.

1 — известняки; 2 — сланцы; 3 — полиметаллическая жила; графики: 4 — основных наблюдений, 5 — повторных наблюдений.

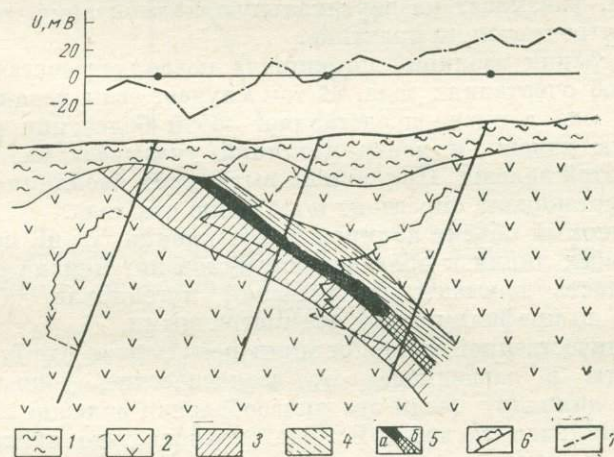


Рис. 145. Карта графиков потенциала на медноколчеданном месторождении (по М. А. Чефас и В. А. Шафаренко).

1 — четвертичные отложения и кора выветривания; 2 — порфириты; 3 — яшмы; 4 — кварц-серicitовые и хлоритовые сланцы; 5 — медноколчеданные руды: а — богатые, б — бедные; графики потенциалов: 6 — в скважине, 7 — по линии разведочных скважин (данные наземной съемки).

Линии профилей на плане служат осями абсцисс графиков (см. рис. 147).

Результаты скважинных наблюдений обрабатывают аналогично наземным в соответствии с применявшимся способом измерений.

При этом при работе способом потенциала равномерно разбрасывают по всем точкам как разницу показаний прибора на контрольной точке, так и разность значений поляризации электродов в начале и конце измерений. При работе способом градиентов определяют невязку по сумме значений ΔU по прямому (при спуске кабеля) и обратному (при подъеме кабеля) ходам, которую затем разбрасывают по всем измерениям.

Результаты скважинных наблюдений представляют в виде карт графиков потенциала по поисково-разведочным скважинам, на которых помещают также графики потенциала, полученные по линиям скважин при наземной съемке. Пример такой карты приведен на рис. 145.

§ 6. ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Завершающим этапом изучения естественного поля является истолкование полученных карт и графиков потенциала.

По области минимальных значений потенциала на картах эквипотенциальных линий и картах графиков потенциала можно приблизительно установить местоположение искомого объекта. Отсутствие на карте областей максимальных значений потенциала, расположенных в непосредственной близости от областей минимумов потенциала, указывает на вертикальную поляризацию тела, с чем обычно и встречаются на практике.

Конфигурация изолиний потенциала позволяет составить представление об очертаниях тела. В том случае, если изолинии слабо вытянуты, тело в плане представляет собой более или менее изометрическую залежь и центр изолиний указывает на положение эпицентра этой залежи. При сильно вытянутых изолиниях ось зоны минимума потенциала определит положение оси тела.

Если искомый объект поляризован наклонно, то на карте эквипотенциальных линий к области минимумов потенциала будет прилежать область повышенных значений потенциала, а графики потенциала по профилям будут асимметричными.

При количественной интерпретации результатов съемки вытянутые объекты в зависимости от геологических данных можно уподоблять цилиндру (если это линзообразная залежь) или пласту (если это жильная залежь). Вполне очевидно, что протяженность такого тела в горизонтальном направлении будет заведомо меньше длины аномальной зоны, очерченной на карте эквипотенциальных линий.

Рассмотрим один из способов определения глубины залегания и размера сферической залежи.

Вычислим потенциал вертикально поляризованной сферы в точке, удаленной от эпицентра на расстояние, равное глубине залегания h центра сферы; для этого в формулу (VII.6) подставим $x = h$; тогда

$$U_{x=h} = -2\epsilon_0 r_0^3 / 2 \sqrt{2} h^2.$$

Поскольку в эпицентре (при $x = 0$) согласно выражению (VII.7) потенциал имеет экстремальное значение

$$U_{\min} = -2\mathcal{E}\sigma_0^2/h^2,$$

то отношение

$$U_{x=h}/U_{\min} = 1/2\sqrt{2} \approx 0,35.$$

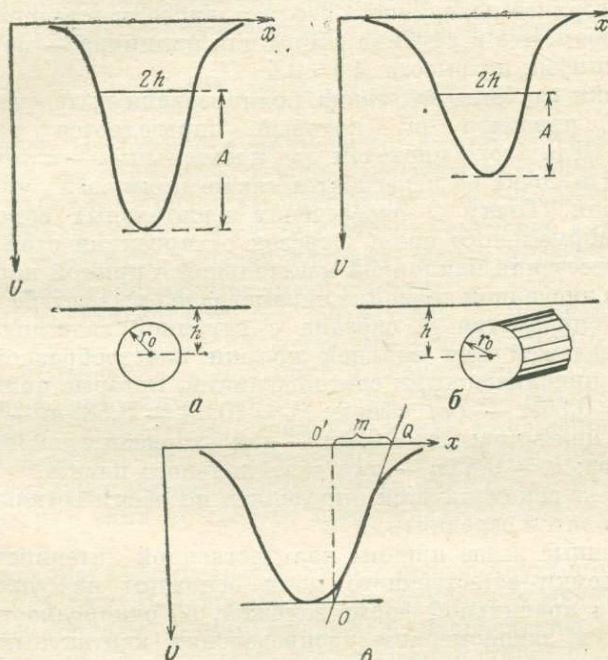


Рис. 146. Интерпретация аномалий естественного поля. Определение глубины залегания: *a* — поляризованной сферы по графику потенциала, *б* — вертикально поляризованного горизонтального цилиндра; *в* — определение величины параметра *m*.

Таким образом, на расстоянии h по обе стороны от эпицентра залежи или от центра аномалии потенциал

$$U_{x=h} = 0,35 |U_{\min}|.$$

Отсюда следует, что расстояние между точками со значением потенциала $0,35 |U_{\min}|$ равно удвоенной глубине залегания центра сферы в масштабе графика. Практически для нахождения глубины h удобнее от точки с минимальным значением потенциала откладывать вверх отрезок $A = 0,65 |U_{\min}|$ (рис. 146, *a*).

Аналогичным путем можно решить задачу и для других тел. В частности, для горизонтального цилиндра, согласно формуле (VII.8), значения U при $x = 0$ и $x = h$ соответственно равны

$$U_{\min} = -2\mathcal{E}\sigma_0/h, \quad U_{x=h} = -2\mathcal{E}\sigma_0/2h,$$

откуда следует, что

$$U_{x=h} = 0,5 |U_{\min}|.$$

Таким образом, ширина минимума на высоте $A = 0,5 |U_{\min}|$ (рис. 146, б) равна удвоенной глубине залегания оси цилиндра в масштабе графика.

Глубина верхней поверхности вертикального пласта определяется тем же способом, что и глубина сферы или цилиндра — по половине ширины минимума на высоте $A = 0,4 |U_{\min}|$.

Для оценки глубины залегания поляризованных тел может быть использован параметр m , который определяется графически (рис. 146, в). Для этого проведем две касательные — к точке минимума кривой и точке ее перегиба, а также прямую на уровне нормального поля. Точку O пересечения касательных спроектируем на прямую нормального поля. Отрезок от проекции этой точки O' до точки пересечения наклонной касательной с прямой нормального поля Q равен численной величине параметра m (в масштабе графика).

Величина параметра m связана с глубиной залегания центра изомерных залежей или верхней кромки пластообразной залежи следующими приближенными соотношениями, которые приводим без вывода: $h = 0,86m$ — для сферы; $h = (0,46 \div 0,58) m$ — для вертикального цилиндра; $h = 0,6m$ — для горизонтального кругового цилиндра; $h = 0,55m$ — для вертикального пласта.

Параметр m рекомендуется определять по обеим ветвям графика потенциала и затем осреднять.

Рассмотренные выше приемы количественной интерпретации результатов съемки естественного поля основаны на упрощающих допущениях о правильной форме залежей, об однородности вмещающей среды и закономерном распределении контактных э. д. с., возникающих на контакте залежей с вмещающей средой.

В природных условиях приходится работать в более сложной физико-геологической обстановке, и поэтому результатам полевых наблюдений придают главным образом качественное истолкование, ограничиваясь выявлением местоположения объектов, создающих аномалии, получением представления об их конфигурации и оценкой вероятных глубин залегания выявляемых тел.

Сложная геологическая обстановка часто обуславливает сложную картину наблюдаемого естественного поля, поэтому выделить аномалии, связанные только с интересующим в данном случае исследователя геологическим объектом или процессом, среди аномалий, вызванных другими причинами, не просто. Это, в первую очередь, касается аномалий, создаваемых рудными залежами. На естественные поля, создаваемые рудными телами, накладываются обычно поля фильтрационных э. д. с., а также поля, связанные с углестыми и графитизированными породами и зонами непромышленной вкрапленности сульфидных минералов, особенно пирита. Чтобы правильно разобраться в картине естественного поля, полученной при полевых наблюдениях, необходимо использовать все имеющиеся

геологические данные и результаты работ, полученные другими геофизическими методами.

Влияние фильтрационных полей учитывают путем сопоставления полученных карт и графиков с топографической картой участка съемки. Фильтрационное поле обычно закономерно возрастает в сторону общего понижения рельефа. Для учета изменений естественного поля во времени проводят повторные съемки и результаты основных и повторных наблюдений совмещают на одном графике (см. рис. 144).

§ 7. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Оценивая возможности применения метода естественного поля, следует прежде всего иметь в виду относительную простоту методики полевых работ и их большую производительность (до 200—300 физических точек в смену). В связи с этим применение метода экономически целесообразно во всех случаях, когда имеются соответствующие физико-геологические предпосылки.

Наиболее благоприятными объектами исследований являются тела, сложенные хорошо проводящими сульфидными рудами, графитами, антрацитами и залегающие в гидрогеологической обстановке, отвечающей условиям возникновения естественных электрических полей. Метод может быть применен и для выявления объектов неполяризующихся, но приуроченных к другим поляризующимся телам (например, к графитизированным или пиритизированным породам), которые сами по себе не представляют поисково-разведочного интереса.

Повышению эффективности метода способствует высокая электропроводность руд. Неблагоприятными факторами являются глубокое залегание зеркала подземных вод и интенсивное развитие зоны окисленных руд (так называемая «железная шляпа»).

Можно наметить два основных направления применения метода естественного поля: а) геологическое картирование; б) поиски месторождений полезных ископаемых.

При геологическом картировании метод позволяет прослеживать участки графитизированных, углистых и шунгитоносных пород, выявлять зоны пиритизированных и пирротинизированных, а также магнетитсодержащих пород. Картирование таких участков и зон дает возможность не только выявлять площадное распространение соответствующих отложений и образований в тех случаях, когда установлена генетическая связь их с процессами графитизации или пиритизации пород, но и определять участки, перспективные в отношении полиметаллических и сульфидных месторождений. В частности, пиритизация является результатом гидротермальных и пневматолитических процессов, с которыми связаны месторождения золота, молибдена, вольфрама и других редких и цветных металлов.

Метод широко используют на месторождениях медноколчеданных руд и сульфидных месторождениях никеля (см. рис. 145). Он находит применение и на месторождениях касситерита, а также

на месторождениях некоторых редких металлов в тех случаях, когда рудные тела содержат в качестве сопутствующих минералов пирит, пирротин и другие хорошо проводящие сульфиды.

Более сложным объектом для применения метода естественного поля являются полиметаллические месторождения (см. рис. 143). Это можно объяснить тем, что галенит-сфалеритовым рудам свойственно значительно большее, чем другим сульфидам, удельное сопротивление, что приводит к существенному ослаблению электрического поля. К тому же образующиеся при электрохимических реакциях вторичные минералы свинца и цинка (сульфаты, охры) обладают очень слабой растворимостью и, оставаясь на месте

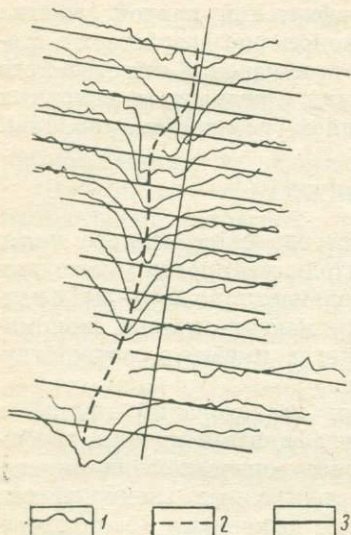


Рис. 147. Карта графиков потенциала естественного поля на месторождении антрацита (по В. Н. Дахнову)

1 — кривые U ; 2 — пласт антрацита; 3 — профили

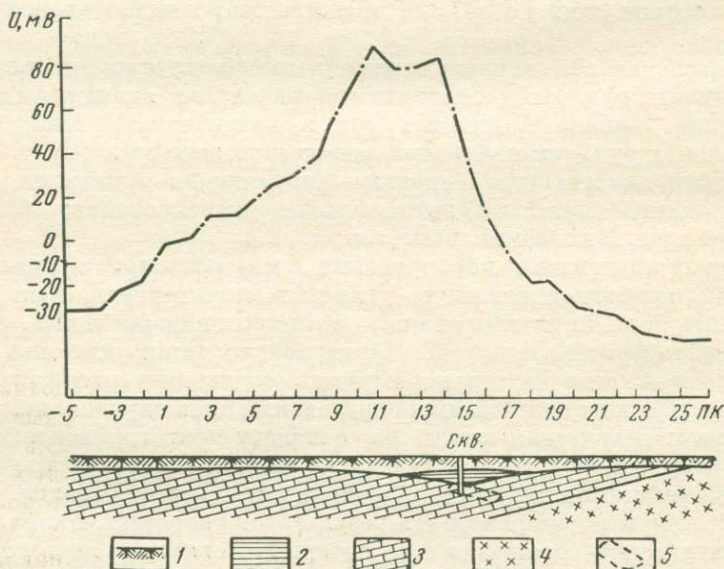


Рис. 148. График потенциала естественного поля над выходом источника под наносы (по Н. Северьяновой).

1 — аллювий; 2 — древний аллювий; 3 — известняки; 4 — туфы изверженных пород; 5 — карстовая полость.

образования, препятствуют поляризации первичных руд. В силу этих обстоятельств в большинстве случаев над залежами полиметаллических руд наблюдаются только слабые аномалии. Однако присутствие в полиметаллических телах в качестве примесей сульфидов железа и меди благоприятствует развитию более интенсивных полей.

Метод находит также применение при поисках месторождений графита и антрацита (рис. 147).

Особой областью использования метода естественного поля является изучение процессов фильтрации подземных вод. Наблюдение естественных электрических полей фильтрационного происхождения позволяет определять направление движения грунтовых потоков, выявлять места фильтрации вод через гидротехнические сооружения, обнаруживать зоны циркуляции трещинных вод и их выходы под наносы. В качестве примера на рис. 148 изображен график потенциала естественного поля над карстовой полостью, через которую происходит питание водами аллювиальных отложений.

МЕТОД ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

§ 1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА

Метод вызванных потенциалов (сокращенно — метод ВП) основан на наблюдении в полевых условиях вызванной поляризации, под которой понимается электрохимический процесс, происходящий

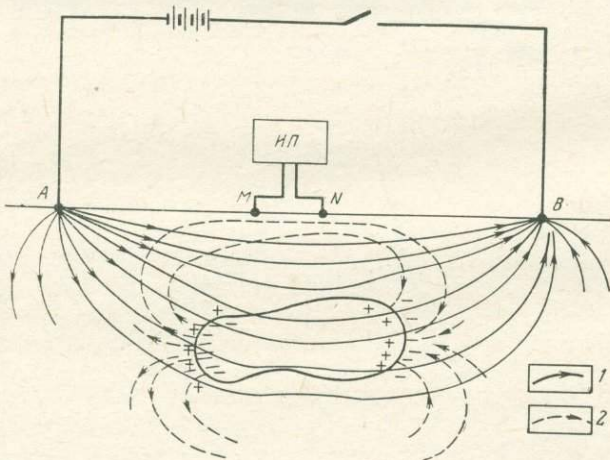


Рис. 149. Схема возникновения поля вызванной поляризации и способ его наблюдения.

Токовые линии: 1 — первичного поля, 2 — вторичного поля; ИП — измерительный прибор.

в горных породах под воздействием протекающего через них постоянного тока и выражающийся в появлении вторичных электродвижущих сил (рис. 149).

Для наблюдения вызванной поляризации через систему заземленных (питающих) электродов пропускают постоянный ток. Во время пропускания тока, называемого в этом случае поляризующим, между измерительными заземлениями возникает разность

потенциалов, величина которой определяется силой тока, взаимным расположением питающих и приемных заземлений, характером геоэлектрического разреза; это та разность потенциалов, которая измеряется во всех модификациях метода сопротивлений. Обозначим ее через $\Delta U_{\text{КС}}$. После выключения тока между измерительными заземлениями наблюдается некоторая остаточная, спадающая со временем до нуля разность потенциалов, наличие которой объясняется поляризацией того объема пород, через который до этого протекал электрический ток. Эту остаточную разность потенциалов называют разностью вызванных потенциалов и обозначают через $\Delta U_{\text{ВП}}$ (рис. 150).

По знакам величины $\Delta U_{\text{ВП}}$ и $\Delta U_{\text{КС}}$ у поверхности земли совпадают.

Процентное отношение $\Delta U_{\text{ВП}}$ к $\Delta U_{\text{КС}}$, называемое поляризуемостью η , и является тем параметром, который используют в методе вызванных потенциалов для изучения геологического разреза. Так как $\Delta U_{\text{ВП}}$ является убывающей во времени величиной, то для сопоставления результатов отдельных измерений поляризуемости принято замеры $\Delta U_{\text{ВП}}$ проводить в один и тот же момент времени, а именно, через 0,5 с после выключения поляризующего тока, или же приводить замеренную величину $\Delta U_{\text{ВП}}$ к этому времени посредством поправочного коэффициента τ_t (табл. 6).

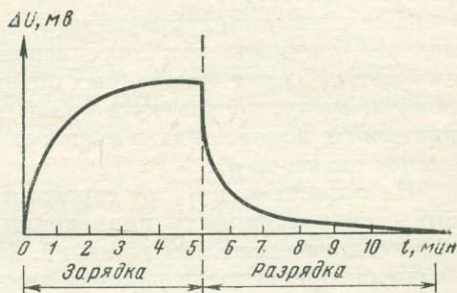


Рис. 150. График ΔU при наблюдении вызванной поляризации.

Таблица 6

$t, \text{с}$	$\tau_t = \Delta U_{\text{ВП}}, t / \Delta U_{\text{ВП}} 0,5$
0,5	1,00
1	0,84
2	0,73
5	0,55
10	0,44
60	0,20

Если среда по поляризуемости однородна, то отношение $\frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{КС}}} \times 100\%$ представляет истинное значение поляризуемости данной среды. Для неоднородной среды то же отношение будет зависеть как от пространственного распределения объемов пород различной поляризуемости, так и от расположения питающих и измерительных заземлений. По аналогии с кажущимся сопротивлением в этом случае

мы получим так называемую кажущуюся поляризуемость η_k . Поскольку типичными (общими) условиями при проведении электроразведки являются условия неоднородных сред, то

$$\frac{\Delta U_{\text{ВП}}}{\Delta U_{\text{КС}}} \cdot 100\% = \eta_k; \quad (\text{VIII.4})$$

и лишь в случае однородной среды то же отношение даст истинную поляризуемость η .

Кажущуюся поляризуемость, как и кажущееся сопротивление, нельзя понимать как осредненное значение истинной поляризуемости отдельных однородных объемов, образующих данную неоднородную среду, поскольку в одной и той же неоднородной среде при различных положениях и разностях заземлений может быть получено разное значение η_k .

На зависимости η_k от строения геоэлектрического разреза основывается возможность применения метода вызванных потенциалов для геологических исследований. Непосредственная задача, которая ставится при использовании метода, — это изучение пространственного распределения η_k . Опираясь на сведения об истинной поляризуемости отдельных разновидностей пород и руд, мы можем установить особенности геологического строения исследуемого участка и на этой основе решать задачи геологического картирования и поисков месторождений полезных ископаемых, главным образом рудных.

Переходя к более подробному рассмотрению явления вызванной поляризации, прежде всего следует обратить внимание на то, что отдельно взятый однородный по электропроводности проводник, как электронный (металлическое тело), так и ионный (произвольный объем раствора), не обнаруживает способности к поляризации. Вызванная поляризация наблюдается лишь в сложных средах, состоящих из твердого вещества и жидкости — электролита (к ним относятся и горные породы, и руды в естественном состоянии), и непосредственно связана с возникновением двойных электрических слоев на границе твердой и жидкой фаз. При этом во всех случаях ВП проявляется внешне одинаково, различаясь только по интенсивности и по некоторым деталям своего возникновения в зависимости от того, является ли твердая фаза диэлектриком (породообразующие минералы) или электронным проводником (рудные минералы, графит и др.).

Рассмотрим возникновение ВП рудных объектов более подробно. При пропускании поляризующего тока через такой объект, находящийся во вмещающей ионно-проводящей породе и содержащий в своих порах природную влагу, пограничный слой электролита приобретает положительный потенциал у поверхности объекта со стороны положительного питающего электрода и отрицательный потенциал — со стороны отрицательного электрода. Под влиянием создавшегося электростатического поля у поверхности рудного объекта за счет перераспределения ионов электролита создается

двойной электрический слой. Его существование поддерживается пропускаемым током. Рудный объект становится поляризованным. При выключении тока начинается разрядка двойного слоя и восстановление нейтрального распределения ионов в электролите. Это вторичное поле, спадающее в некоторый промежуток времени до нуля, и является полем вызванной поляризации, которое характеризуется при наблюдениях величиной $\Delta U_{\text{ВП}}$.

На этот процесс, осложняя и усиливая его, накладывается деформация двойного электрического слоя, возникающего на границе электролита и электронного проводника еще до пропускания поляризующегося тока за счет так называемых электродных процессов — взаимодействия металлов с растворами. Эти процессы заключаются в том, что при опускании электронно-проводящего тела в электролит катионы металла (в рудных объектах — металла, входящего в состав рудных минералов) под воздействием сильно поляризованных молекул воды переходят в раствор. Вследствие этого поверхность тела приобретает отрицательный заряд, а в слое раствора, прилегающем к поверхности тела, за счет электростатического поля этого заряда концентрируются положительные ионы. Возникает двойной электрический слой, характеризующийся скачком потенциала $\Delta U_{\text{к}}$. В зависимости от способности того или иного металла отдавать катионы в раствор, а также от состава раствора при некотором значении $\Delta U_{\text{к}}$ наступает электролитическое равновесие.

При пропускании через эту систему поляризующего тока равновесие нарушается, двойной слой перестраивается, что ведет к изменению величины $\Delta U_{\text{к}}$, т. е. фактически к появлению дополнительной разности потенциалов. После выключения поляризующего тока равновесие в двойном слое восстанавливается и дополнительная разность потенциалов исчезает.

Поскольку явление ВП связано с процессами на границах фаз, то становится очевидным, что на интенсивность ВП должна влиять суммарная поверхность электронно-проводящих частиц рудного объекта. Последовательное чередование на пути поляризующего тока электронных и ионных проводников должно вызвать увеличение общего эффекта ВП. Этим объясняется эффективность применения метода ВП при поисках и разведке вкрапленных руд.

В ионно-проводящих объектах (а к ним относятся все горные породы, не содержащие рудных вкрапленников) вызванная поляризация проявляется значительно слабее — поляризуемость пород измеряется долями и первыми единицами процентов (у рудных же объектов или пород со значительной рудной вкрапленностью она составляет десятки процентов).

Двойные электрические слои в ионно-проводящих породах образуются за счет адсорбции ионов электролита, заполняющего капилляры породы, чаще всего анионов, поверхностью минеральных частиц. Под влиянием поляризующего тока равновесие в пространственном распределении ионов разного знака (зарядов) в пределах двойного слоя нарушается. С одной стороны, заряды диффузной

части слоя смещаются вдоль оси капилляров; с другой стороны, происходит электролитический перенос ионов электролита, что вызывает неравномерное изменение концентрации раствора как внутри диффузной части двойного слоя, так и в пределах микроучастков по всему поляризуемому объему породы и приводит к возникновению диффузионных потенциалов.

После выключения поляризующего тока происходит восстановление деформаций двойного слоя и выравнивание концентраций под воздействием диффузионных потенциалов — возникает спадающее во времени поле ВП.

Изучение явления ВП показало, что величина $\Delta U_{ВП}$ зависит от длительности предшествующего пропускания поляризующего тока или так называемой зарядки (рис. 150). С увеличением времени зарядки величина $\Delta U_{ВП}$ быстро возрастает, но затем рост ее замедляется, и она постепенно достигает некоторого предельного значения (состояние насыщения).

Время насыщения зависит от состава и состояния поляризуемой среды: оно меньше для рыхлых отложений с высокой проводимостью, больше для массивных кристаллических пород и относительно велико для руд и минералов с электронной проводимостью. Практически же, чтобы получить величину $\Delta U_{ВП}$, близкую к максимальной, время зарядки достаточно ограничить 3—5 мин. Но поскольку в полевых условиях выделяемые аномальные эффекты в большинстве случаев имеют относительный характер, то обычно время пропускания берут меньшим, что положительно сказывается на производительности труда.

Спад (разрядка) вызванной разности потенциалов после выключения тока происходит по закону, близкому к экспоненциальному:

$$\Delta U_{ВП,t} = \Delta U_{ВП}(0) e^{-kt},$$

где k — постоянная спада; $\Delta U_{ВП}(0)$ — начальное значение $\Delta U_{ВП}$ при $t = 0$.

При длительности зарядки 3—5 мин спад продолжается также в течение нескольких минут, а при длительной зарядке (до 60 мин) $\Delta U_{ВП}$ можно наблюдать еще через 1—2 ч. Но основная часть $\Delta U_{ВП}$ спадает в течение первых нескольких секунд.

Наиболее достоверным способом регистрации вызванных разностей потенциалов является осциллографирование всего процесса зарядки и разрядки. Однако при выполнении производственных поисково-разведочных работ достаточно проводить точечные измерения для одного момента времени.

Метод имеет свои специфические особенности. Так, необходимость измерения нестационарного явления обуславливает особые требования к аппаратуре и технике работ. Наблюдаемые разности вызванных потенциалов в отличие от многих других методов фиксируются при отсутствии первичного поля, что повышает разрешающую способность метода. Поскольку породы с одинаковым удельным

сопротивлением, но с различными влажностью и минерализацией поровой влаги, могут обладать разной поляризуемостью, имеется возможность при помощи метода ВП расчленять разрез, сложенный породами одинакового сопротивления.

В техническом отношении метод ВП имеет много общего с методом сопротивлений. При исследовании тем и другим методом измерительная установка должна иметь питающую и измерительную цепи. А поскольку для определения η_k необходимо измерять также $\Delta U_{КС}$, то при работах методом ВП могут применяться все виды установок и все модификации способов полевых исследований метода сопротивлений. В связи с этим наблюдения методом ВП обычно комплексировуют с работами одной из модификаций метода сопротивлений и кроме величины η_k определяют также и ρ_k .

§ 2. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ. АППАРАТУРА

Режимы измерений. В сложившейся к настоящему времени практике работ методом ВП применяются три режима (или способа) возбуждения поля ВП и его измерения (рис. 151): 1) режим одиночных импульсов; 2) периодически-импульсный режим; 3) режим разнополярных импульсов.

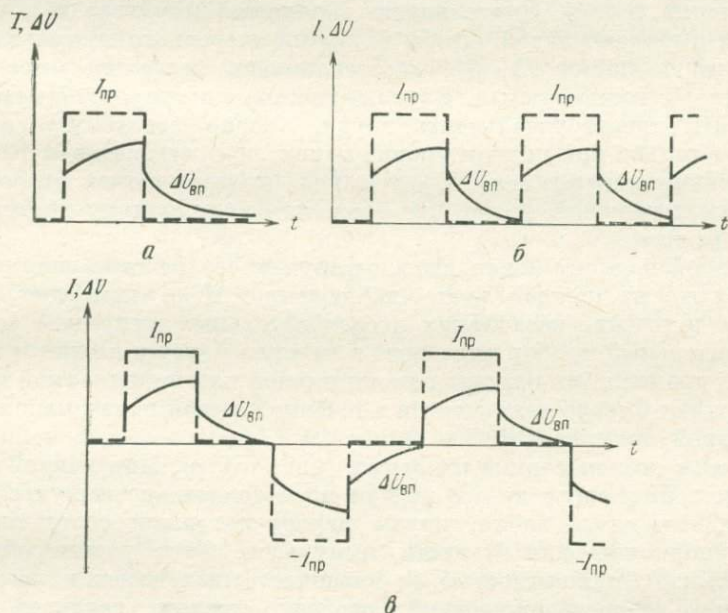


Рис. 151. Режимы возбуждения и регистрации поля ВП.

а — одиночных импульсов; б — периодически-импульсный; в — разнополярных импульсов.

Режим одиночных импульсов (рис. 151, а). На первых этапах развития метода этот режим являлся преобладающим (так как он

наиболее прост в осуществлении) и применялся в двух вариантах: а) одиночных (точечных) измерений через 0,5 с после выключения поляризующего тока; б) осциллографической регистрации всего процесса зарядки и разрядки. Для производственных условий режим ввиду низкой производительности измерений неэффективен и в настоящее время почти не применяется. Однако он является наилучшим для детального изучения процесса ВП и его временных характеристик.

Периодически-импульсный режим (рис. 151, б). При работе в таком режиме поляризующий ток включается однополярными импульсами, паузы между которыми равны или несколько меньше длительности импульса. Этот режим используется также в двух вариантах. Первый вариант получил название режима с подзарядкой и заключается в том, что в течение одного цикла зарядных импульсов $\Delta U_{ВП}$ измеряют в нескольких точках между представленными заранее несколькими парами приемных заземлений. Перед началом цикла измерений проводят зарядку в течение 2—3 мин, а затем измеряют $\Delta U_{ВП}$ между каждой парой заземлений поочередно. Для этого по окончании основной зарядки ток выключают на 2—3 с для записи $\Delta U_{ВП}$ и снова включают на 15—20 с для подзарядки, после чего проводят измерения на второй паре заземлений и т. д. Длительность зарядных импульсов и пауз для записи выбирают такой, чтобы за время очередного импульса (подзарядки) величина $\Delta U_{ВП}$ восстановилась настолько, насколько она спала в течение паузы. Вариант режима с подзарядкой позволяет повысить производительность труда, однако требуемую точность он дает только при низком уровне помех, не превышающем 10—15% от величин измеряемых $\Delta U_{ВП}$; такой уровень помех встречается в полевых условиях редко, что препятствует широкому применению этого режима.

Второй вариант периодически-импульсного режима заключается в том, что на каждой точке наблюдения $\Delta U_{ВП}$ измеряют многократно в течение нескольких последовательных импульсов и пауз. Измерительный прибор включают в каждую паузу и в один и тот же момент времени при помощи накопительной или инерционной ячейки определяют быстро меняющиеся в течение каждой паузы напряжение вызванной поляризации.

Режим разнополярных импульсов (рис. 151, в). При работе в этом режиме в питающую линию подают последовательно импульсы тока противоположного знака, паузы между которыми составляют не менее половины длительности импульсов. Этот режим обладает наибольшей защищенностью от низкочастотных помех и позволяет повысить точность измерений, особенно малых величин $\Delta U_{ВП}$, так как с осциллограммы можно снимать удвоенное значение измеряемых разностей потенциалов.

Рассмотренные приемы изучения вызванной поляризации основаны на исследовании переходного процесса — спада вторичного поля после выключения тока в питающем устройстве.

Переходные характеристики, т. е. зависимости вторичных полей от времени, однозначно связаны с частотными характеристиками — зависимостями поля от частоты. Эта связь обосновывает возможность изучения процесса вызванной поляризации путем исследования зависимости амплитуды и фазы периодически меняющегося поля от частоты. В настоящее время разработаны и начали применяться два основных способа полевых работ методом ВП в гармонически меняющихся полях. Они основаны на следующих физических положениях.

Процесс образования двойных электрических слоев на поверхности раздела фаз и последующей их разрядки после исчезновения поляризующего поля формально может быть уподоблен зарядке и разрядке конденсаторов, обкладки которых расположены на поверхности раздела фаз. В дисперсных средах, в которых процесс вызванной поляризации носит объемный характер, наличие двойных слоев-конденсаторов приводит к тому, что в гармонически меняющихся полях удельное сопротивление среды оказывается зависящим от частоты поля, т. е. $\rho = \rho(\omega)$.

Характер этой зависимости определяется поляризуемостью горных пород и руд, слагающих геoeлектрический разрез. Последнее обстоятельство и позволяет применять для метода ВП поля, меняющиеся по косинусоидальному закону. Полученные результаты свидетельствуют о большой производственной эффективности этого режима возбуждения, так как в несколько раз сокращается время измерений на одной точке, а благодаря применению усилителей в приемной линии — существенно уменьшается мощность источника тока.

Первый способ наблюдений ВП в гармонически меняющихся полях заключается в изучении зависимости амплитуды такого электрического поля от частоты (иногда этот способ называют методом частотной дисперсии). Обычно амплитуду гармонически меняющегося поля измеряют на двух частотах (высокой и низкой) и по результатам измерений вычисляют коэффициент, характеризующий поляризуемость среды:

$$\eta_{k\omega} = \frac{\rho(\omega_H) - \rho(\omega_B)}{\rho(\omega_B)} \cdot 100\%. \quad (\text{VIII.2})$$

Второй способ состоит в изучении зависимости фазы электрического поля от частоты.

Установки, применяемые в обоих способах, аналогичны применяемым при работе методом ВП на постоянном (ступенчато меняющемся) поле. Частоты, на которых проводятся измерения, должны быть такими, чтобы различия амплитуд и фаз на этих частотах, обусловленные влиянием вызванной поляризации, были достаточно велики. Вместе с тем частоты должны быть настолько низкими, чтобы индукционные явления, которые могут привести к искажению величины поля при изменении частоты, существенно не сказались на результатах измерений. Практически применяемый диапазон частот лежит в интервале десятых долей — первых десятков герц.

Общие требования к аппаратуре. Аппаратура, применяемая при исследованиях методом ВП, должна, с одной стороны, удовлетворять требованиям метода сопротивления, с другой — специфике измерений нестационарных разностей потенциалов $\Delta U_{ВП}$ в соответствии с особенностями метода и способами возбуждения и наблюдения поля ВП.

Одно из основных требований, предъявляемых к аппаратуре, — это преодоление помех, возникающих в процессе наблюдений. Источниками помех при работе методом ВП могут быть: а) непостоянство электродных потенциалов и вызванная поляризация приемных электродов под действием токов в измерительной цепи; б) наличие блуждающих и теллурических токов и меняющихся во времени естественных полей; в) вызванная поляризация металлических предметов, находящихся в земле вблизи от измерительных заземлений.

Для уменьшения помех первого вида, как и при исследовании методом естественного поля, применяют неполяризующиеся электроды. Вызванную поляризацию тех же электродов можно уменьшить путем увеличения входного сопротивления измерительной аппаратуры (порядка 1—2 МОм). Благодаря этому ток в приемной линии не превышает единиц микроампер и вызванная поляризация приемных электродов составляет не более 0,1 мВ.

Помехи второго вида обычно удается преодолеть увеличением наблюдаемых величин $\Delta U_{ВП}$ за счет увеличения силы поляризующего тока или уменьшением разностей MN . Кроме того, блуждающие токи можно отфильтровывать посредством соответствующих ячеек в измерительном канале. Влияние меняющихся во времени естественных полей обычно исключают при помощи компенсаторов поляризации. Для ослабления помех от теллурических токов рекомендуется измерения выполнять в периоды ослабления вариаций поля ТТ.

Помехи третьего вида способствуют появлению ложных аномалий. Для их устранения рекомендуется измерительные заземления относить в сторону от обсадных труб скважин, вкопанных в землю металлических столбов, конструкций и т. п.

Источники должны создавать в питающей цепи ток силой, достаточной для того, чтобы измеряемые величины $\Delta U_{ВП}$ были не меньше 0,5 мВ и превышали уровень помех не менее чем в 10 раз. При этом колебания силы тока допустимы в пределах $\pm 3\%$, что обеспечивает надлежащую точность измерений η_k и ρ_k .

Рассчитать требуемую силу поляризующего тока можно следующим образом. Пусть минимально допустимое значение $\Delta U_{ВП}$ составляет m . Тогда при данном среднем значении кажущейся поляризуемости η_k разность потенциалов поляризующего поля

$$\Delta U_{КС} \geq m/1000\eta_k,$$

где ΔU в В; η_k — в относительных единицах.

С другой стороны,

$$I = K \Delta U_{\text{КС}} / \rho_{\text{к}};$$

здесь K — коэффициент установки.

Отсюда

$$I \geq mK / 1000 \rho_{\text{к}} \eta_{\text{к}},$$

где I в А.

Для симметричной четырехточечной установки

$$K = \pi A M A N / M N \approx \pi A O^2 / M N;$$

тогда

$$I \geq m \pi A O^2 / 1000 \rho_{\text{к}} \eta_{\text{к}} M N.$$

Напряжение источника можно определить умножением вычисленной силы тока на сопротивление $R_{\text{АВ}}$ питающей линии.

Так, для работы с установкой, у которой $AB = 800$ м и $MN = 20$ м, при $\rho_{\text{к}} = 400$ Ом·м, $m = 0,5$ мВ и $\eta_{\text{к}} = 2\%$ необходим ток 1,7 А. Если $R_{\text{АВ}}$ составит 350 Ом, источник тока должен иметь мощность порядка 4 кВт.

Измерительный прибор должен обладать в соответствии с указанным выше требованием высоким входным сопротивлением и обеспечивать измерение $\Delta U_{\text{ВП}}$ с погрешностью не более $\pm 2\%$, а силы поляризующего тока — $\pm 3\%$. Чувствительность прибора ограничивается уровнем неустранимых помех и по опыту работ может быть в пределах 0,5—1 мВ на 100 делений шкалы.

Заземления. В связи с тем, что поляризующий ток может достигать большой величины, в питающей линии используют провода с низким сопротивлением и надежной изоляцией. В измерительных линиях можно применять облегченные провода с хлорвиниловой изоляцией.

Сопротивление заземления питающих электродов должно быть возможно меньше, так как в этом случае для создания в питающей линии тока нужной силы потребуются источники меньшей мощности. Заземления надо устраивать по возможности в местах с влажной почвой (или увлажнять грунт вокруг электродов); следует увеличивать число отдельных стержней-заземлителей. Особое значение приобретает обеспечение стабильности поляризующего тока, иногда в течение нескольких часов (например, при работе по схеме среднего градиента). С этой целью плотность тока не должна превышать десятых долей миллиампера на 1 см² поверхности электродов. При употреблении обычных стержней диаметром около 20 мм с забивкой их на глубину 15—20 см через каждый заземлитель можно посылать ток силой не более 0,1 А в условиях сухих почв и до 0,5 А — при влажных почвах. Пользуясь этими значениями, можно ориентировочно определять число электродов для питающих заземлений.

Неполяризующиеся электроды для заземлений M и N применяются такие же, как в методе естественного поля. Необходимо только особенно тщательно следить за постоянством концентрации раствора медного купороса, так как разница в концентрации

раствора, содержащегося в двух электродах, на 10—20% создает разность потенциалов между электродами до 1 мВ. Различие температуры растворов на 1° С вызывает изменение поляризации электродов на 0,7—1 мВ, поэтому электроды в процессе полевых измерений необходимо располагать по возможности в одинаковых условиях (освещенные и теневые участки и т. п.).

Станции ВП. В соответствии с описанными выше режимами измерений и требованиями к аппаратуре в нашей стране были разработаны и выпущены большими сериями электроразведочные станции для работы методом вызванной поляризации под общим шифром ВП: ВП-59, ВП-62, ВПО-62, ВПС-63 и ВПП-67¹. Станции ВП-59, ВП-62 и ВПС-63 смонтированы в автомашинах; станция ВПП-67 — переносная; аппаратура станции ВПО-62 состоит из отдельных блоков, которые легко демонтируются и могут перевозиться выюком или переноситься на руках.

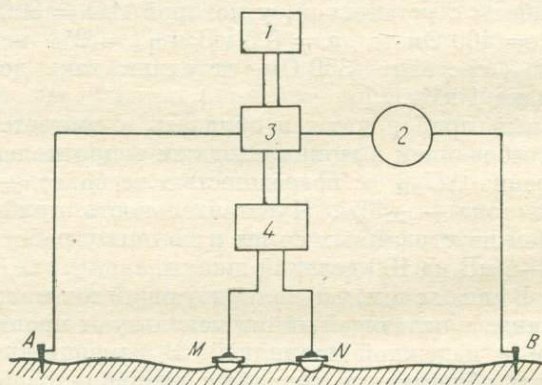


Рис. 152. Блок-схема электроразведочных станций ВП.

Все названные станции сконструированы по единой блок-схеме (рис. 152). Источник тока *I* через коммутирующее устройство *З* подключен к амперметру *2* и питающим заземлениям *A* и *B*. К тому же коммутатору подключен измерительный прибор *4*, измеряющий ΔU_{KC} между заземлениями *M* и *N* при пропускании тока и $\Delta U_{ВП}$ после его выключения.

В станциях ВП-59, ВП-62 и ВПС-63 источниками тока являются генераторы постоянного тока, приводимые в движение от двигателя автомашины. Мощность генераторов 11,5 кВт, напряжение 460 В, сила тока — 25 А. В станциях ВПО-62 и ВПП-67 применяются автономные бензоэлектрические агрегаты переменного тока мощностью соответственно 1 и 0,5 кВт. Напряжение вырабатываемого генераторами тока повышается трансформатором до 500 В, а затем

¹ Расшифровка: ВПО — станция ВП облегченная, ВПП — станция ВП переносная, ВПС — станция ВП для скважинных исследований; цифры обозначают год разработки модели станции.

выпрямляется. Станция ВПП-67, кроме того, приспособлена для работы с батареями или аккумуляторами.

Измеряемые разности потенциалов в станциях ВП-59 и ВП-62 регистрируются шлейфовым электроразведочным осциллографом ЭПО-7 с диапазонами измерений $\Delta U_{\text{КС}}$ от 1 до 1000 мВ, $\Delta U_{\text{ВП}}$ — от 1 до 300 мВ на ширину ленты 100 мм; маркировщик времени наносит марки через 0,5 с.

В станциях ВПО-62, ВПС-63 и ВПП-67 измерительный прибор позволяет производить визуальный отчет $\Delta U_{\text{КС}}$ и $\Delta U_{\text{ВП}}$ в заданные моменты времени, начиная с 0,5 с после выключения тока. Пределы измерений $\Delta U_{\text{КС}}$ — от 3 до 3000 мВ, $\Delta U_{\text{ВП}}$ — от 1 до 300 мВ на шкалу в 100 делений. Станция ВПС-63 имеет также осциллограф. Коммутирующее устройство служит для включения и выключения поляризирующего тока по заданной программе в соответствии с выбранным режимом измерений, а также для переключения чувствительности измерительного канала при переходе от измерения $\Delta U_{\text{КС}}$ к измерению $\Delta U_{\text{ВП}}$. Кроме того, в станциях ВПО-62, ВПП-67 и ВПС-63 коммутирующее устройство управляет импульсным вольтметром, который «запоминает» мгновенное значение $\Delta U_{\text{ВП}}$ (0,5), удерживая его в течение некоторого времени, достаточного для взятия отсчета по шкале прибора.

Все станции снабжены неполяризуемыми и питающими электродами, катушками с проводами, полевыми телефонами, а станция ВПС-63 — еще и каротажной лебедкой (на 900 м кабеля) и скважинным зондом.

Рассмотрим устройство станции ВПО-62 более подробно (рис. 153). Станция предназначена для работы в режимах одиночных и разнополярных импульсов и состоит из трех основных блоков: бензоэлектрического агрегата (бензиновый двигатель, генератор и панель управления), пульта управления генераторной установки и измерительного прибора. Ток генератора G , вращаемого бензиновым двигателем $БД$, поступает на трансформатор Tr . Посредством переключателя $П$ можно на выпрямитель B подать напряжение от 70 до 560 В (ступенями, кратными 70). Выпрямленное напряжение через контакторы K подается на питающие заземления A и B . Контактторы могут переключаться посредством реле вручную или автоматически по заданной программе, для чего служит автомат времени AB . Сила тока измеряется амперметром A .

Измерительный прибор включает в себя компенсатор поляризации приемных электродов $KП$, градуировочное устройство $ГУ$, автокомпенсатор AK , импульсный вольтметр $ИВ$, стрелочный прибор $СП$, ячейку задержки $ЯЗ$.

Компенсатор поляризации имеет предел компенсации до ± 200 мВ.

На входе автокомпенсатора измеряемая величина ΔU преобразуется при помощи вибропреобразователя в прямоугольные импульсы, а затем усиливается и детектируется. На выходе автокомпенсатора посредством цепей коммутации включается либо стрелочный прибор, если измеряется $\Delta U_{\text{КС}}$, либо импульсный

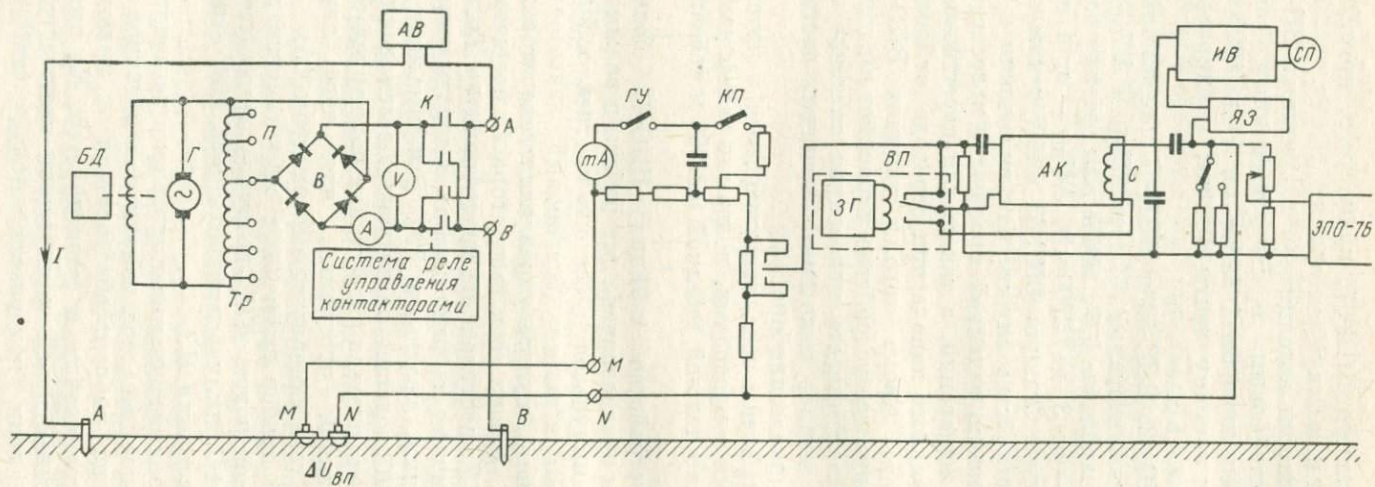


Рис. 153. Структурная схема станции ВПО-62.

вольтметр *ИВ*, если измеряется $\Delta U_{\text{ВП}}$. При измерении $\Delta U_{\text{ВП}}$ на выход автокомпенсатора через 0,5 с после выключения тока подключается также конденсатор *С*, который заряжается до напряжения, имеющегося на выходе автокомпенсатора. Подключение конденсатора производится автоматически ячейкой задержки *ЯЗ*. Конденсатор разряжается очень медленно (на 5—10% за 1 мин), и поэтому стрелочный прибор на выходе импульсного вольтметра в течение времени, достаточного для снятия визуального отсчета, показывает величину $\Delta U_{\text{ВП}}$.

Градуировочное устройство служит для контроля за чувствительностью измерительного прибора.

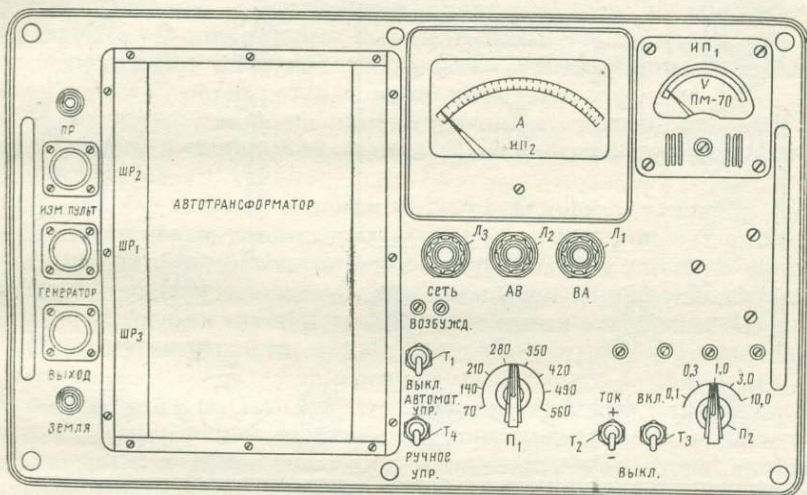


Рис. 154. Общий вид панели управления пульты генераторной установки станции ВПО-62.

В том случае, если из-за сильных помех визуальный отсчет по стрелочному прибору невозможен, импульсный вольтметр отключается и на выход автокомпенсатора подключается осциллограф ЭПО-7.

На рис. 154 изображен общий вид панели управления пульты генераторной установки станции ВПО-62, а на рис. 155 — панели управления измерительного прибора.

На панели управления пульты генераторной установки расположены: тумблер T_1 , замыкающий цепь возбуждения генератора; тумблер T_2 , переключающий ток в линии АВ; тумблер T_3 , включающий напряжение в линию АВ; тумблер T_4 , включающий или ручное управление или автомат времени; переключатель Π_1 напряжения в питающей линии; переключатель Π_2 пределов измерения силы полярирующего тока; вольтметр $ИП_1$ для измерения напряжения в питающей линии; амперметр $ИП_2$ для измерения силы полярирующего тока; лампочка L_3 , сигнализирующая о включении напряжения на пульт; лампочка L_2 , указывающая на включение тока в пита-

ющую линию в направлении BA ; лампочка L_1 , сигнализирующая о включении тока в питающую линию в обратном направлении AB .

Три разъема с левой стороны панели служат: $ШР_1$ — для подключения кабеля, соединяющего пульт управления с генератором; $ШР_2$ — для подключения кабеля, соединяющего пульт управления с измерительным прибором; $ШР_3$ — для подключения линии AB .

На панели управления измерительного прибора расположены: переключатель B_1 чувствительности измерений $\Delta U_{ВП}$; переключатель рода работ B_2 ; включатель B_3 питания измерительного при-

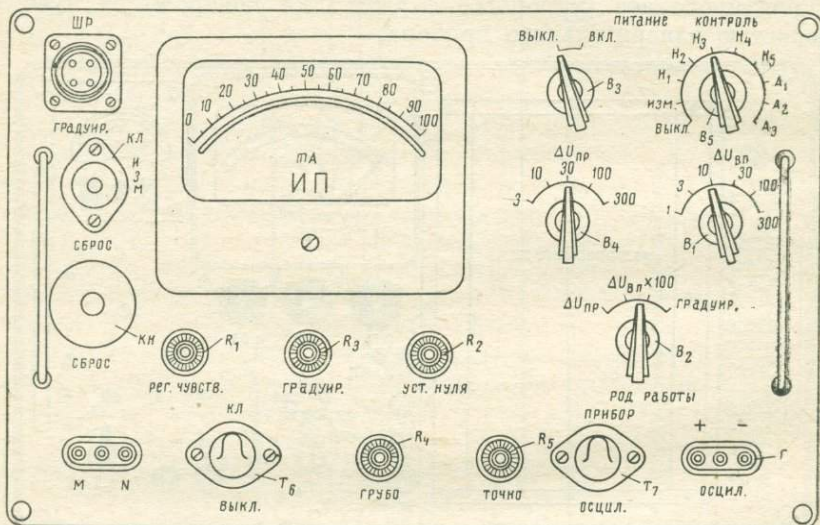


Рис. 155. Общий вид панели управления измерительного прибора станции ВПО-62.

бора; переключатель B_4 чувствительности измерений $\Delta U_{КС}$; переключатель B_5 для проведения контроля за работой отдельных узлов и питания и для включения прибора; тумблер T_6 , включающий компенсатор поляризации; тумблер T_7 для включения на выход автокомпенсатора импульсного вольтметра или осциллографа; пять рукояток потенциометров — R_1 — для регулировки чувствительности импульсного вольтметра, R_2 — для установки нуля импульсного вольтметра, R_3 — для установки силы тока в градуировочном устройстве, R_4 — для грубой компенсации поляризации, R_5 — для точной компенсации поляризации; $КЛ$ — переключатель входной цепи в положении градуировки, измерений и установки нуля импульсного вольтметра; $КН$ — кнопка для измерения напряжения импульсным вольтметром; MN — гнезда для подключения измерительной линии; $Г$ — гнезда для подключения осциллографа; $ИП$ — микроамперметр для визуального отсчета $\Delta U_{КС}$ и $\Delta U_{ВП}$. Разъем $ШР$ служит для соединения кабелем измерительного прибора с пультом управления.

§ 3. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

При работе методом ВП в настоящее время наиболее часто применяются установки срединного градиента, комбинированного профилирования и вертикального зондирования.

Установки срединного градиента и комбинированного профилирования используются для площадных поисковых съемок. Но применение установки срединного градиента более целесообразно, так как она не требует переноса питающих электродов после каждого измерения, способствуя тем самым повышению производительности труда.

Не следует пользоваться этой установкой при полого-слоистой структуре разреза с изменением поляризуемости в вертикальном направлении. В этом случае формы графиков осложняются, в центральных частях участков наблюдений (для данного положения электродов AB) образуются ложные аномалии.

Разнос $AB/2$ установки комбинированного профилирования должен превышать глубину залегания объектов исследования не менее чем в 1,5—2 раза.

Вертикальные зондирования с симметричной установкой $AMNB$ выполняют с целью детализации выявленных при поисках аномалий, изучения поляризуемости пород на глубине. При высоком сопротивлении покровных отложений, осложняющем устройство питающих заземлений, рекомендуется поменять местами электроды AB и MN по принципу взаимности, если только помехи (см. § 2 этой главы) не будут препятствовать измерениям на больших разнотах MN .

Работы начинают с определения поляризуемости пород и рудных тел в их естественном залегании, установления нормального фона поляризуемости рудовмещающих отложений, характера аномалий и оценки аномальных значений η_k над теми геологическими образованиями, которые будут в дальнейшем являться объектом поисков. Для этого проводят наблюдения на отдельных участках с известным геологическим разрезом, а также выполняют измерения вдоль отдельных профилей (маршрутов) значительной протяженности, пересекающих все разновидности пород, слагающих изучаемый район. В процессе этих наблюдений изучают характер помех и намечают способы их преодоления, выявляют условия заземления. Для выбора времени зарядки снимают кривые зависимости $\Delta U_{ВП}$ от времени зарядки. Разносы питающих электродов определяют по данным вертикальных зондирований ВП или подбирают путем повторных наблюдений над известными объектами. Разносы приемных электродов зависят от детальности съемок, но они не должны превышать горизонтальных поперечных размеров искомых объектов. Наконец, опытные работы позволяют также получить данные для выбора сети наблюдений площадных съемок.

Производственные работы выполняют обычно в два этапа. На первом этапе — поисковом — наблюдения проводят по всей площади работ. На втором этапе выявленные аномалии детализируют посредством сгущения сети наблюдений в пределах аномальных участков;

кроме того, проводят профили вдоль аномальных зон (по простиранию объектов), выполняют вертикальные зондирования ВП для изучения поведения аномалий на глубине. В ряде случаев целесообразно повторять наблюдения с другими разносами электродов.

Сеть наблюдений подготавливают так же, как и в других методах электроразведки.

Общий порядок работ при съемках методом ВП аналогичен работам с соответствующими установками методом сопротивлений, выполняемым при профилировании и зондировании. Поэтому рассмотрим только специфичные вопросы техники измерений при наблюдении ВП на примере работы со станцией ВПО-62.

Работа со станцией ВПО-62. В процессе подготовки сети наблюдений оператор, являющийся руководителем работ электроразведочного отряда, самостоятельно или совместно с начальником партии знакомится с местностью и намечает пути подъезда и места стоянок станции. При невозможности подъезда станции непосредственно к профилям или точкам ВЭЗ станцию демонтируют и переносят отдельными блоками к месту работ.

Работы со станцией выполняют в следующей последовательности.

После установки электродов в заданном положении и подключения их к проводам питающей и приемной линий старший рабочий докладывает оператору о готовности линий к измерениям.

До начала измерений осуществляют проверку аппаратуры в следующем порядке.

1. Проверяют напряжение источников питания измерительного прибора. Для этого переключатель B_3 ставят в положение «вкл.», а переключатель B_5 последовательно переводят во все рабочие положения; при каждом положении стрелка прибора должна устанавливаться в пределах соответствующих меток шкалы.

2. Выполняют калибровку прибора в соответствии с заводской инструкцией по аппаратуре.

3. Проверяют работу генератора. С этой целью переключатель $П_1$ ставят в положение «70», а ручку плавной регулировки выводят влево; в этих условиях при работающем генераторе напряжение выпрямленного тока должно быть равно нулю.

Эти проверки проводят ежедневно. Периодически через два-три дня проверяют также линейность шкал автокомпенсатора и импульсного вольтметра.

Закончив проверку аппаратуры, оператор путем пробных измерений (обычно в режиме одиночных импульсов) подбирает нужные напряжение и силу тока в питающей линии, чувствительности и пределы измерений в каналах измерения $\Delta U_{\text{КС}}$ и $\Delta U_{\text{ВП}}$, устанавливает уровень и характер имеющихся помех. На основании этих наблюдений определяет оптимальный режим последующих рабочих измерений.

Режим одиночных импульсов. При работе в этом режиме оператор проводит измерения в следующем порядке.

1. При помощи переключателя B_3 включает питание измерительного прибора.

2. Переключатели B_5 и $KЛ$ ставит в положение «изм.», а переключатель рода работы B_2 — в положение « ΔU_{KC} ».

3. Включает компенсатор поляризации (тумблер T_6); переключатель чувствительности B_1 ставит в положение «1» или «3» и рукоятками потенциометров R_4 и R_5 грубой и точной компенсации поляризации стрелку прибора выводит на нуль.

4. В течение некоторого времени контролирует стабильность скомпенсированной поляризации (и естественной разности потенциалов) измерительных электродов. Тумблер T_7 ставит в положение «прибор».

5. Дает указание мотористу завести двигатель; включает генератор и устанавливает необходимую силу поляризующего тока.

6. Тумблер T_4 ставит на ручное управление, тумблером T_2 в питающую линию посылает ток и одновременно включает секундомер.

7. В течение 2—3 мин пропускания поляризующего тока следит по амперметру панели управления за постоянством его величины и при необходимости корректирует ее ручкой плавной регулировки. Силу тока записывает в журнал.

8. Переключатель рода работ B_2 ставит в положение « ΔU_{KC} », переключателем чувствительности B_4 устанавливает такой предел измерений ΔU_{KC} , чтобы отклонение стрелки прибора составляло не менее одной трети шкалы. (Если величина ΔU_{KC} превышает 300 мВ, переключатель B_2 выводится в положение « $\times 100$ ».) В журнал записывает предел измерения по переключателю B_4 (или B_2) и отсчет по шкале.

9. После измерения ΔU_{KC} переводит переключатель B_2 в положение « $\Delta U_{ВП}$ », а переключателем чувствительности B_1 устанавливает ожидаемый предел измерений (и в этом случае предел выбирается таким, чтобы отклонение стрелки по возможности было не менее $\frac{1}{3}$ шкалы).

10. По истечении времени зарядки при помощи тумблера T_2 выключает ток и по прибору снимает отсчет $\Delta U_{ВП}$, который записывает в журнал вместе с пределом измерений.

11. При необходимости последовательно через 15, 30, 60 с после выключения тока кнопкой $КН$ запускает ячейку задержки и записывает величину $\Delta U_{ВП}$ в соответствующие моменты времени.

Вычислитель рассчитывает величины η_K и ρ_K , заносит их в журнал и на полевой график.

По окончании измерений оператор подает команду о порядке последующих измерений (переход на следующую точку, перенос приемных электродов — при профилировании или съемке средних градиентов, увеличение разноса питающих заземлений при зондировании и т. п.).

В процессе работ оператор следит за ходом графиков η_k и ρ_k и в точках, где ход графика резко нарушается, при необходимости проводит повторные измерения.

Результаты измерений заносят в журнал следующей формы.

Журнал для записи наблюдений методом ВП с установкой

Участок Профиль Азимут Дата
 АВ MN Шаг Начало наблюдений
 А (ПК) В (ПК) Конец наблюдений
 Напряжение → Время зарядки Погода

Режим одиночных импульсов

N точки (пикета) стояния заземлений		K, м	I, А	ΔU_{KC}			$\Delta U_{ВП}$			$\Delta U_{ВП}, мВ$			$\eta_k, \%$	$\rho_k, Ом \cdot м$	Примечание	
M	N			предел из- мерений	отсчет	значение, мВ	предел изме- рений	отсчет	значение, мВ	15 с	30 с	60 с				

Режим разнополярных импульсов. При работе в этом режиме порядок измерений следующий.

1. Заводят двигатель и устанавливают необходимую силу тока.
2. Включают питание измерительного прибора посредством переключателя B_3 .
3. Тумблером T_4 включают автомат времени.
4. Переключатели B_5 и $KЛ$ ставят в положение «изм.», а тумблер T_7 — в положение «прибор».
5. Переключатель рода работ B_2 устанавливают в положение « ΔU_{KC} » или « $\times 100$ » в зависимости от ожидаемой величины ΔU_{KC} .
6. Предел измерения ΔU_{KC} (переключателем B_4) устанавливают так, чтобы стрелка отклонялась не менее чем на одну треть шкалы.
7. Включают компенсатор поляризации и рукоятками R_1 и R_5 подбирают компенсацию так, чтобы при обеих полярностях поляризующего тока стрелка по возможности устанавливалась в одно положение или в достаточно близкие положения. В журнал записывают предел измерений и отсчеты ΔU_{KC} по шкале при обеих полярностях тока.
8. Переключатель B_2 переводят в положение « $\Delta U_{ВП}$ », а переключатель B_1 устанавливают на ожидаемый предел измерений так, чтобы при обеих полярностях тока стрелка отклонялась не менее чем на треть шкалы. В журнал записывают предел измерений и отсчеты $\Delta U_{ВП}$ по шкале при обеих полярностях тока.
9. Вычисляют и записывают в журнал значения ΔU_{KC} и $\Delta U_{ВП}$, соответствующие среднему отсчету отклонений стрелки при обеих

полярностях тока. По найденным средним значениям ΔU_{KC} и $\Delta U_{\text{ВП}}$ вычисляют η_k и ρ_k и заносят в журнал и на полевой график.

Записи ведут в журнале следующей формы.

Журнал для записи наблюдений методом ВП с установкой

Участок . . . Профиль . . . Азимут Дата
 АВ MN Шаг Начало наблюдений
 А (ПК) В (ПК) Конец наблюдений
 Напряжение Время зарядки Погода

Режим разнополярных импульсов

№ точки (пикета) стояния заземлений		К, м	I, А	ΔU_{KC}				$\Delta U_{\text{ВП}}$				значение, мВ	$\eta_k, \%$	$\rho_k, \text{Ом}\cdot\text{м}$	Примечание	
				предел измерений	отсчет			предел измерений	отсчет							значение, мВ
М	Н	при +I	при -I		средний	значение, мВ	при +I		при -I	средний	значение, мВ					

Измерения в режиме разнополярных импульсов целесообразно проводить при наличии сильных помех или при малых значениях $\Delta U_{\text{ВП}}$ (при слабой дифференциации пород по поляризуемости или на больших разносах зондирований).

Если необходимо перейти от визуальной регистрации к осциллографической, то осциллограф подключают к соответствующим клеммам Г панели измерительного прибора, а тумблер Т ставят в положение «осцилл.». В зависимости от марки осциллографа режимы регистрации подбирают на самом осциллографе или на панели измерительного прибора.

Журнал наблюдений дополняют графой для регистрации осциллограмм и осциллографических кадров.

На рис. 156 приведены примеры получаемых осциллограмм.

Измерения ВП в скважинах. Скважинные измерения ВП позволяют придать изучению поля вызванной поляризации объемный характер путем прослеживания изменения поляризуемости на глубину, дают возможность выявлять наличие локальных поляризуемых объектов в окрестностях скважин. Измерения проводят преимущественно с трехточечной установкой (второе питающее заземление относят в бесконечность). Могут применяться три системы наблюдений:

- 1) скважина — поверхность;
- 2) поверхность — скважина;
- 3) скважина — скважина.

Для этих систем слева указано положение питающего заземления, справа — область измерений.

При работе по системам 1 и 3 питающее заземление в скважине необходимо располагать по возможности ближе к искомым рудным

объектам и в том интервале глубин, где сопротивление вмещающих пород наименьшее. При работе по системе 2 питающий электрод заземляют вблизи устья скважины, а иногда его поочередно относят в разные направления от скважины и, располагая на одинаковых расстояниях, проводят несколько циклов измерений (так называемая азимутальная съемка), что позволяет более однозначно определить положение рудных тел относительно скважины.

Измерительная линия при скважинных наблюдениях имеет раз-нос от 1 до 10 м; измерения ведут с шагом, равным MN . При работе

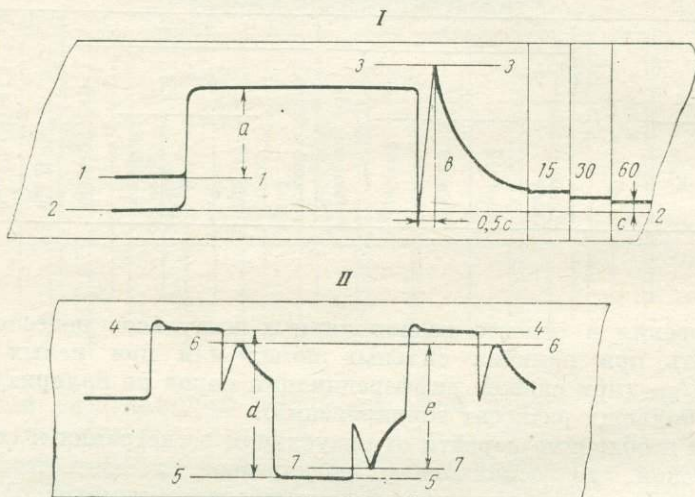


Рис. 156. Осциллограммы регистрации ВП.
 I — в режиме одиночных импульсов; II — в режиме разнополярных импульсов.

по системе 1 измерения целесообразно вести с Г-образной установкой и измерять на каждой точке значения η_k по линии профиля (η_{kx}) и перпендикулярно к профилю (η_{ky}), вычисляя затем полное значение поляризуемости

$$\eta_{k, в} = \sqrt{(\eta_{kx})^2 + (\eta_{ky})^2}.$$

Эффективность такой методики очевидна из рис. 165.

Скважинные наблюдения проводят со станцией ВПС-63, но можно использовать и полевые станции, дополнив их каротажной лебедкой и скважинными неполяризуемыми электродами. Запись наблюдений ведут по приведенным выше формулам журналов в зависимости от выбранного режима измерений.

§ 4. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

При визуальной регистрации $\Delta U_{КС}^{*к}$ и $\Delta U_{ВП}$ обработка наблюдений несложна и заключается в проверке вычислений величин $\Delta U_{КС}$, $\Delta U_{ВП}$, η_k и ρ_k во вторую руку.

Результаты наблюдений изображают в виде графиков η_K и ρ_K по отдельным профилям, карты графиков (при площадной съемке) и кривых вертикальных зондирований η_K и ρ_K (рис. 157, 158 и 159). Их строят так же, как аналогичные графики метода сопротивлений. Графики по отдельным профилям сопровождаются разрезами, на которых показывают рельеф местности; на них наносят также основные

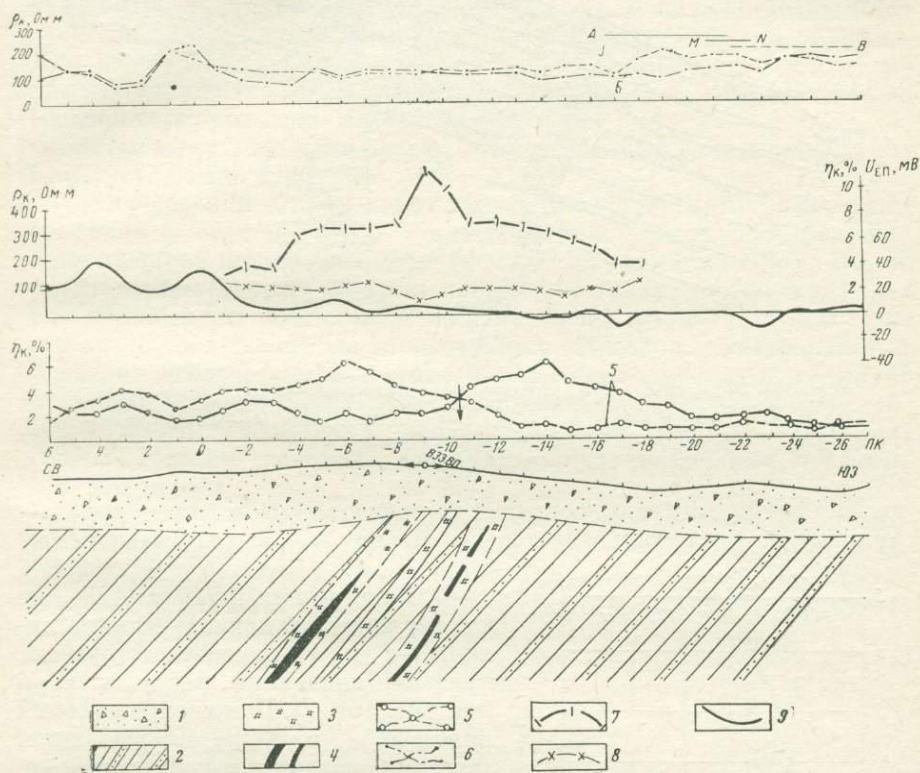


Рис. 157. Графики ρ_K и η_K комбинированного и симметричного профилирования и графики потенциала естественного поля.

1 — делювий; 2 — глинистые сланцы с прослоями песчаников; 3 — вкрапленно-прожилковое оруденение; 4 — сплошные рудные тела; графики: 5 — η_K комбинированного профилирования ($AB = 100$ м, $MN = 20$ м), 6 — ρ_K комбинированного профилирования ($AB = 100$ м, $MN = 20$ м), 7 — η_K симметричного профилирования ($AB = 400$ м, $MN = 20$ м), 8 — ρ_K симметричного профилирования ($AB = 400$ м, $MN = 20$ м), 9 — потенциала естественного поля.

элементы геологического строения; кривые вертикальных зондирований сопровождаются схематическими геологическими колонками или буровыми колонками, если ВЗ выполнялось у скважин.

При работе с осциллографической регистрацией просушенные после проявления фотоленты нумеруют и на них переносят данные из полевого журнала (номера кадров, положение электродов, силу поляризующего тока, чувствительность каналов и т. п.).

По данным градуировок строят градуировочные графики для каждой использовавшейся чувствительности. По оси абсцисс откла-

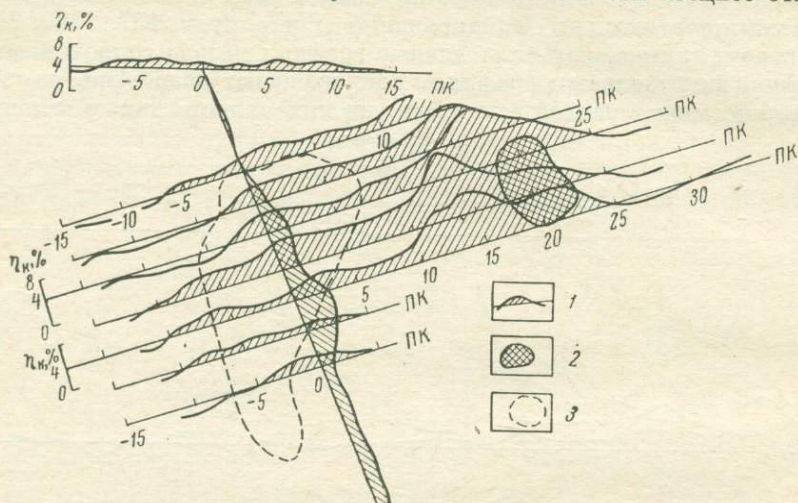


Рис. 158. Карта графиков η_k на сульфидном месторождении (по В. А. Комарову).
1 — графики η_k и зоны с $\eta_k > 4\%$; 2 — баритовое тело; 3 — контур медно-колчеданной залежи.

дывают величины градуировочных импульсов в мВ, по оси ординат — амплитуды отклонений светового блока на фотобумаге в масштабе 1 : 1.

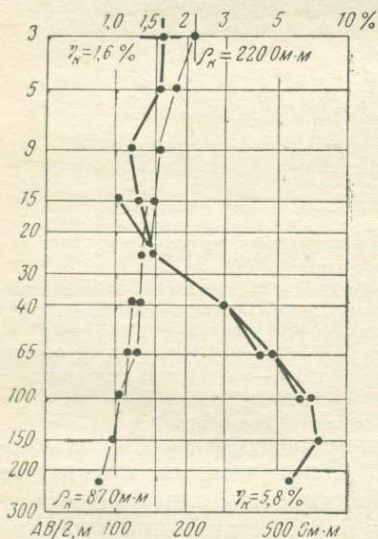


Рис. 159. Кривые зондирования ρ_k и η_k для геологического разреза, изображенного на рис. 157.

Для получения ΔU_{KC} и $\Delta U_{ВП}$ на кадрах проводят горизонтальные линии 1—1 и 2—2, соответствующие нулевым значениям ΔU_{KC} и $\Delta U_{ВП}$ (см. рис. 156, 1). Положение нулевых линий ΔU_{KC} и $\Delta U_{ВП}$ определяется трассами соответствующих гальванометров до включения поляризуемого тока. Затем по маркам времени находят точку трассы гальванометра ВП, отвечающую моменту 0,5 с после включения тока, и через нее проводят горизонтальную линию 3—3.

Величина ΔU_{KC} определяется отрезком a , величина $\Delta U_{ВП}$ — отрезком b осциллограммы. Размеры отрезков снимают измерителем и при помощи градуировочных графиков для соответствующих чувствительностей переводят в милливольты.

При наличии помех, в частности остаточных разностей потенциалов, с осциллограммы снимают отрезок c и величину $\Delta U_{ВП}$ находят по разностному отрезку $b - c$.

На осциллограммах, полученных при работе в режиме разнополярных импульсов (рис. 156, II), проводят линии 4—4 и 5—5 по установившимся отклонениям трассы гальванометра $\Delta U_{КС}$, определяющим разнополярным токовым импульсам. Величина $\Delta U_{КС}$ определяется по половине длины отрезка d между указанными линиями. Для нахождения величины $\Delta U_{ВП}$ проводят линии 6—6 и 7—7 по разнополярным бликам гальванометра $\Delta U_{ВП}$. Искомая $\Delta U_{ВП}$ соответствует половине длины отрезка e .

Затем вычисляют величины η_k и ρ_k , заносят их в журнал и строят соответствующие графики.

Завершающим этапом работ является истолкование полученных графиков и карт η_k и ρ_k , заключающееся в выделении участков с повышенной поляризуемостью (локальных аномалий ВП), которые могут соответствовать рудным зонам или телам, контактам пород различной поляризуемости, а также в оценке размеров и пространственного положения поляризованных объектов. Интерпретацию проводят посредством сопоставления экспериментальных графиков и кривых с теоретически рассчитанными для тел простой геометрической формы и некоторых геоэлектрических разрезов (горизонтально-слоистые разрезы, вертикальные и наклонные контакты и пласты и др.).

Рассмотрим решение некоторых прямых задач метода ВП.

Условимся понимать под поляризующим полем суммарное поле, существующее во время зарядки и равное сумме первичного (поляризующего) поля E_0 и вторичного поля $E_{ВП}$, создаваемого поляризующимся (или поляризованным) телом:

$$E = E_0 + E_{ВП};$$

тогда

$$E_{ВП} = E - E_0.$$

Это соотношение будет справедливо и для потенциалов:

$$U_{ВП} = U - U_0.$$

Таким образом, теоретические расчеты могут быть двоякого рода: расчеты полного поляризующего поля (суммарного явления) и расчеты аномальных полей, обусловленных полем собственно поляризованных тел и наблюдаемых после прекращения пропускания поляризующего тока.

Расчеты полей ВП сложны и здесь не приводятся. Однако составить представление об их характере и получаемых результатах можно, исходя из физических представлений о сущности явления ВП.

В любой, произвольно взятый момент процесса поляризации (как при зарядке, так и при разрядке) поле ВП можно рассматривать как стационарное поле, создаваемое зарядами, объемно

или поверхностно распределенными в поляризуемом (поляризованном) теле. Во времени же поле ВП меняется только количественно (до тех пор, пока при зарядке не достигнет уровня насыщения, а при разрядке — не спадет до нуля). В связи с этим при расчетах временной множитель отбрасывают, а экспериментальные графики η_k строят для одного, общего для всех наблюдений момента времени.

При малых размерах поляризованного тела создаваемое им поле эквивалентно полю диполя. Тела же (объемы) конечных размеров создают более сложные поля, так как каждое поляризованное тело должно рассматриваться как совокупность пространственно распределенных диполей.

Поместим сферу относительно малых размеров с поляризуемостью η в однородное электрическое поле E_0 (поле удаленного источника).

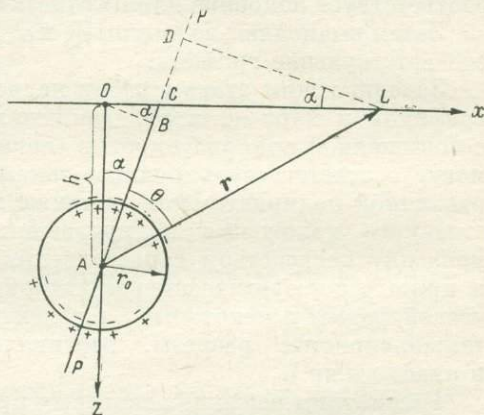
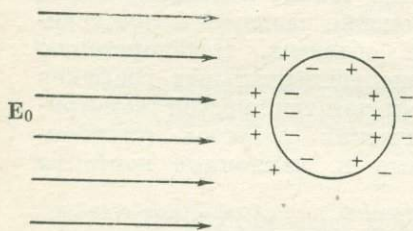


Рис. 160. Поляризованная сфера в однородном электрическом поле.

Рис. 161. Пояснение к расчету поля наклонно поляризованной сферы.

Под влиянием этого поля сфера поляризуется, на ее поверхности появляется двойной электрический слой, с которым и связывается возникновение поля поляризации $E_{ВП}$ (рис. 160).

Расчет поля такой горизонтально поляризованной сферы может быть выполнен способом, аналогичным способу, примененному в гл. VII. Полагая, что величина $E_{ВП}$ распределена на поверхности сферы по закону косинуса и что при переходе через поверхность сферы будет отмечаться скачок потенциала $\Delta U_{ВП}$, равный значению $E_{ВП}$, потенциал на поверхности сферы

$$U_{ВП} = E_{ВП} \cos \theta. \quad (\text{VIII.3})$$

Тогда в соответствии с выражением (VII.4) поле поляризованной сферы во внешнем пространстве будет совпадать с полем диполя, помещенного в центре сферы:

$$U_{ВП} = E_{ВП} r_0^3 \frac{\cos \theta}{r^2}. \quad (\text{VIII.4})$$

Рассмотрим сначала общий случай поля сферы с осью поляризации, наклоненной относительно вертикали на угол α . Начало координат O расположим, как это показано на рис. 161, в эпицентре на поверхности земли.

Чтобы получить выражение для потенциала в произвольной точке L , подставим в формулу (VIII.4) значения $\cos \theta$ и r , выраженные через координату x точки L и глубину центра h сферы. Для этого опустим из точек L и O перпендикуляры на ось поляризации PP . Тогда из треугольника ADL

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{AD}{r} = \frac{AB + BC + CD}{r} = \frac{h \cos \alpha + OC \sin \alpha + CL \sin \alpha}{r} = \\ &= \frac{h \cos \alpha + x \sin \alpha}{r}; \end{aligned}$$

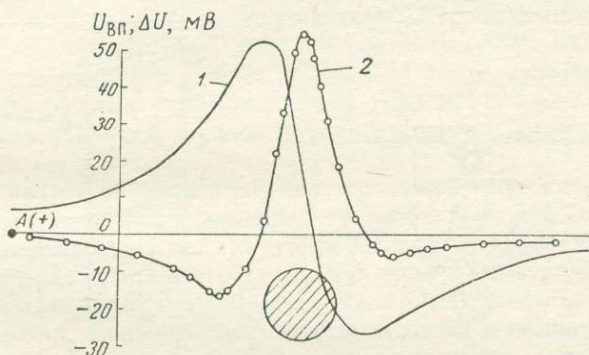


Рис. 162. Графики $U_{ВП}$ (1) и $\Delta U_{ВП}$ (2) над поляризованной сферой в поле точечного источника тока.

из треугольника AOL

$$r = \sqrt{h^2 + x^2};$$

отсюда

$$U_{ВП} = 2E_{ВП} r_0^2 \frac{h \cos \alpha + x \sin \alpha}{(x^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (\text{VIII.5})$$

Приняв $\alpha = 90^\circ$, получим для горизонтально поляризованной сферы

$$U_{ВП} = 2E_{ВП} r_0^2 \frac{x}{(x^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (\text{VIII.6})$$

Из этого выражения следует, что потенциал горизонтально поляризованной сферы в начале координат (при $x = 0$) равен нулю. Для определения точек экстремумов найдем первую производную по x и приравняем ее нулю. Получим экстремумы при $x = \pm h/\sqrt{2}$.

График потенциала горизонтально поляризованной сферы на поверхности земли показан на рис. 135 (кривая 2).

В поле точечного источника, расположенного на конечном расстоянии от поляризующейся сферы, ее поле характеризуется некоторой асимметричностью, как это видно на рис. 162 (кривая 1).

Зная закон распределения потенциала $U_{ВП}$, можно получить выражения для разности потенциалов $\Delta U_{ВП}$, которая и определяет наблюдаемую поляризуемость η_K . В частности, для поляризованной сферы, находящейся в поле точечного источника, график $\Delta U_{ВП}$ показан на том же рис. 162 (кривая 2).

На рис. 163 изображены графики η_K над поляризованной сферой для установок срединного градиента (рис. 163, а) и комбинированного профилирования (рис. 163, б); в обоих

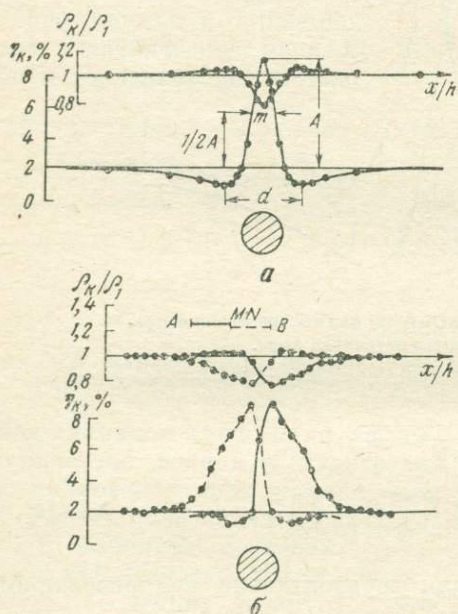


Рис. 163. Графики η_K и ρ_K над хорошо проводящей сферой высокой поляризуемости. Для установки: а — срединного градиента, б — комбинированного профилирования (по В. А. Комарову).

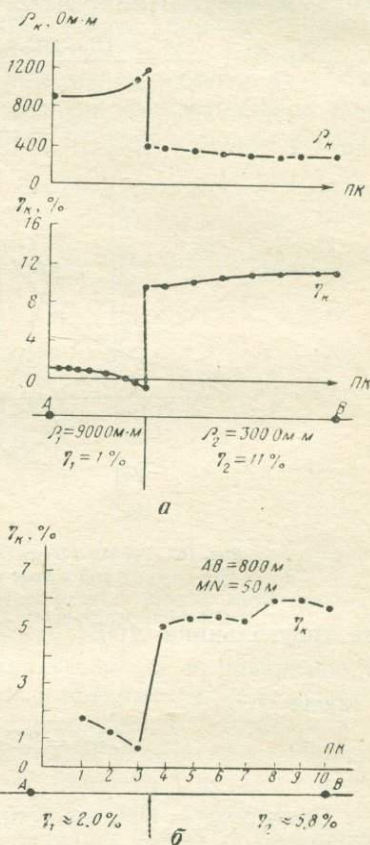


Рис. 164. Графики η_K и ρ_K для установки срединного градиента при профилировании через вертикальный контакт двух сред. а — теоретические; б — экспериментальный.

случаях истинная поляризуемость сферы больше поляризуемости среды.

На рис. 164 представлены графики η_K для установки срединного градиента над вертикальным контактом двух сред.

На этих же рисунках (рис. 163 и 164) изображены графики ρ_K для соответствующих установок. Обращает на себя внимание большое сходство графиков η_K и ρ_K , хотя в целом они как бы обратны друг другу. Так, при профилировании установкой срединного градиента

над вертикальным контактом график η_k , соответствующий переходу из среды с низкой поляризуемостью в среду с высокой поляризуемостью, по форме сходен с графиком ρ_k , отвечающим переходу из среды с низким сопротивлением в среду с высоким сопротивлением. Такая же закономерность устанавливается и при сравнении графиков η_k и ρ_k комбинированного профилирования.

Зондирования ВП для изучения горизонтально-слоистых разрезов применяются еще сравнительно редко (преимущественно при решении гидрогеологических задач).

Кривые ВЭЗ ВП зависят от соотношений мощностей, поляризуемостей, а также удельного сопротивления горизонтов, составляющих геоэлектрический разрез. Асимптотами кривых ВЭЗ ВП, так же как и кривых ВЭЗ, получаемых методом сопротивлений, являются прямые, ординаты которых равны истинным поляризуемостям слоев. При изучении рудных районов кривые ВЭЗ ВП служат главным образом для качественной оценки распространения аномалии ВП на глубину.

Из рассмотрения теоретических графиков вытекают основные положения интерпретации полевых графиков η_k . Эпицентр локального тела повышенной поляризуемости соответствует точке максимума на графике срединного градиента (или симметричного профилирования) или точке перекрестия на графике комбинированного профилирования. Если это тело можно хотя бы в первом приближении уподобить сферическому, то глубина его центра ориентировочно (как показано на рис. 163, а) может быть определена либо по расстоянию d между минимумами ($h \approx 0,4d$), либо по величине хорды m , проведенной на уровне половины высоты A максимума аномалии η_k ($h \approx 1,2m$).

Положение контакта пород различной поляризуемости теоретически соответствует резкому возрастанию η_k , а практически устанавливается по средней точке участка большого градиента η_k .

Интерпретацию графиков η_k начинают с выделения нормального фона. Аномальными участками считаются те, в пределах которых значения η_k не менее чем в 2—2,5 раза превышают фоновое значение η_k . Для оценки уровня нормального фона используют графики профилирования на заведомо безрудных участках.

По характеру аномалий на графиках η_k оценивают природу возмущающего объекта. Локальные максимумы η_k (или перекрестия) отвечают отдельным телам повышенной поляризуемости, ступенчатые изломы графиков соответствуют контактам пластов или пород. Коррелируя аномалии по смежным профилям, оконтуривают области локальных аномалий, трассируют контакты, тектонические или оруденелые зоны, зоны пиритизации и графитизации пород.

Для установления геологической природы аномалий ВП необходимо сопоставлять данные метода с геологическими материалами и результатами наблюдений другими методами.

Выделенные аномальные зоны, контакты наносят на карты графиков.

§ 5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

В настоящее время метод ВП применяется для выделения в геологическом разрезе объектов, обладающих повышенной поляризуемостью. К ним в первую очередь относятся геологические образования, в состав которых входят минералы с электронной проводимостью — сульфиды железа, меди, никеля, свинца, серебра, молибдена, а также магнетит, ильменит, графит (и другие углистые вещества), пиролюзит, самородные металлы и др.

В связи с тем, что поляризационные процессы по своему существу являются поверхностными, наибольшие эффекты ВП вызываются не сплошными скоплениями, а вкрапленниками перечисленных минералов, поскольку при равных массах рудного вещества суммарная поверхность вкрапленников намного больше поверхности сплошного рудного тела.

Таким образом, поиски и разведка вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд — основная задача метода ВП. Наряду с этим метод ВП применяют для поисков массивных руд. Аномалии ВП, наблюдаемые в окрестностях залежей массивных руд, связаны, с одной стороны, с поляризационными процессами на контакте залежи с вмещающей средой и, с другой стороны, с поляризацией ореола вкрапленных руд, обычно окружающих залежь массивных руд (рис. 165).

Следует иметь в виду, что при общей зараженности пород сульфидной минерализацией или углистым веществом обычно наблюдается большое число аномалий и выделить среди них перспективные в отношении поисков промышленных руд трудно. В этих случаях метод ВП комплексировать с другими геофизическими и геохимическими методами.

Анализируя результаты комплексных работ, можно в ряде случаев более однозначно оценить природу геофизических аномалий. Так, аномалии ВП над скоплениями магнетита или пирротина коррелируются с магнитными аномалиями; аномалии, обуславливаемые сульфидами меди, железа, графитом или углистым веществом в породе, увязываются с аномалиями естественного поля. Сочетание метода ВП с металлотрической съемкой может существенно повысить эффективность съемки, позволяя по ореолам рассеяния того или иного элемента в делювии отыскивать гипогенные ореолы или рудные залежи в коренных породах.

В связи с тем, что поляризуемость ионно-проводящих пород зависит от их гранулометрического состава, влажности и минерализации (см. гл. I), метод ВП применяют при поисках воды для расчленения разрезов, сложенных осадочными породами, с целью выделения коллекторов вообще и пресных водоносных горизонтов в частности. При решении задач подобного рода используют профилирование (для оконтуривания линз пресных вод) и зондирование ВП.

Заслуживают внимания попытки применения ВП для инженерно-гидрогеологического картирования с целью выделения зон с тем

или иным характером осадочных отложений в зависимости от преобладания глинистых или песчаных разностей, степени обводненности, минерализации подземных вод и других критериев, учитываемых при исследованиях такого рода. В этом отношении следует отметить работы геофизической группы института

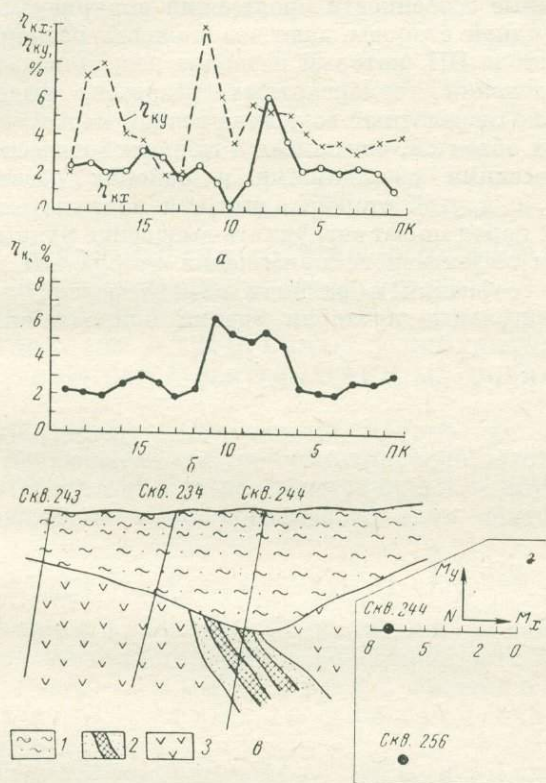


Рис. 165. Скважинные измерения ВП по системе скважина — поверхность земли на сульфидном месторождении (по А. Н. Балашеву).

Графики: а — $\eta_{кx}$ и $\eta_{кy}$; б — полной кажущейся поляризуемости $\eta_{к}$; в — схематический геологический разрез; г — план расположения профиля и скв. 256, в которую помещен питающий электрод А; 1 — четвертичные отложения; 2 — рудные жилы и зона сульфидной вкрапленности; 3 — вмещающие породы.

ВСЕГИНГЕО, которой удалось экспериментальным путем установить коррелятивные связи между геофизическими параметрами, в первую очередь η и ρ , определяемыми в процессе измерений методом ВП, с одной стороны, и гидрогеологическими параметрами отдельных комплексов пород и отложений — с другой, и на этой основе получить количественные оценки водоносности пород и минерализации подземных вод.

В последние годы была установлена аномально высокая поляризуемость ионно-проводящих пород, находящихся в мерзлом состоянии.

К тому же эти породы оказываются и более дифференцированными по поляризуемости по сравнению с породами в талом состоянии. Значение η мерзлых пород достигает 10% и более. Причина этого явления заключается, по-видимому, в большой роли контакта лед — вода в образовании потенциалов ВП.

Установленные особенности проявления поляризуемости у мерзлых пород, с одной стороны, дают возможность расширить область применения метода ВП, который позволит решать задачи литологического расчленения геомерзлотных разрезов, выделения межмерзлотных и подмерзлотных вод, линз вечной мерзлоты и жильных льдов и других объектов, связанных с гидрогеологическими и инженерно-геологическими изысканиями в районах развития вечной мерзлоты. Но, с другой стороны, высокая поляризуемость вмещающих мерзлых пород может затруднять выделение рудных аномалий, и поэтому для эффективного применения метода ВП при решении задач рудной геофизики в районах вечной мерзлоты необходимо искать дополнительные критерии оценки природы аномалий ВП.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПЕРЕМЕННЫМИ ПОЛЯМИ

§ 1. ПОНЯТИЕ О ГАРМОНИЧЕСКИ МЕНЯЮЩИХСЯ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

При электроразведке переменными полями часто исследуют гармонически меняющиеся электромагнитные поля, в которых напряженность, плотность тока, разность потенциалов и другие характеристики меняются по косинусоидальному (или синусоидальному) закону:

$$\mathbf{H} = H_0 \cos(\omega t + \varphi_H), \quad \mathbf{E} = E_0 \cos(\omega t + \varphi_E), \quad \mathbf{j} = j_0 \cos(\omega t + \varphi_j) \text{ и т. д.},$$

где \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{j} — мгновенные значения напряженности электрического и магнитного полей, а также плотности тока в момент времени t ; H_0 , E_0 , j_0 — амплитудные значения соответствующих величин; ω — угловая частота или число периодов в 2π секунд.

Аргументы правой части выражений для \mathbf{H} , \mathbf{E} и \mathbf{j} носят название фазы соответствующей величины, а φ — начальной фазы, т. е. фазы в момент времени $t = 0$.

Если две величины гармонически меняются с одинаковой угловой частотой ω и имеют при этом различные начальные фазы φ_1 и φ_2 , то разность их фаз будет

$$(\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Эту разность называют сдвигом фаз.

Обычно начальную фазу тока I в питающем устройстве (цепи заземлений, генераторной рамке и т. п.) принимают равной нулю, т. е. $\varphi_I = 0$.

В этом случае начальные фазы всех остальных величин, характеризующих поле (φ_H , φ_j и др.), являются одновременно сдвигом фазы соответствующей величины поля относительно фазы тока в питающем устройстве.

В отличие от постоянного электрического поля, зависящего только от распределения источников поля и удельного сопротивления пород, слагающих геоэлектрический разрез, переменное электромагнитное поле зависит также и от диэлектрической постоянной ϵ и магнитной проницаемости μ горных пород. Во все формулы, определяющие поведение компонент поля, электрические параметры пород γ , ϵ и μ входят не порознь, а в виде так называемого волнового числа k , определяемого следующим выражением:

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu \left(1 + i \frac{\gamma}{\omega \epsilon} \right). \quad (\text{IX.1})$$

Само волновое число, так же как и его квадрат, является величиной комплексной:

$$k = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu \left(1 + i \frac{\gamma}{\omega \epsilon} \right)} = a + bi, \quad (\text{IX.2})$$

где a и b — коэффициенты при действительной и мнимой частях:

$$a = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right]}, \quad (\text{IX.3})$$

$$b = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]}.$$

Для методов электроразведки, в которых применяются поля низких частот (единицы — тысячи герц), $\gamma \gg \omega \epsilon$. В этом случае в выражении (IX.1) для k^2 единиц можно пренебречь. Тогда

$$k^2 = i \gamma \mu \omega,$$

т. е.

$$k = \sqrt{\gamma \mu \omega} \sqrt{i};$$

отсюда

$$|k| = \sqrt{\gamma \mu \omega}.$$

В немагнитной среде, для которой в системе СИ $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м,

$$|k| = 2,81 \cdot 10^{-3} \sqrt{f|\rho|}; \quad (\text{IX.4})$$

здесь f выражено в Гц, а ρ — в Ом·м.

Характерной особенностью выражений, определяющих зависимость компонент электромагнитного поля от расстояния до источника поля r и волнового числа k , является то, что в эти выражения волновое число входит только в виде произведения, т. е. kr . Модуль этого произведения носит название численного расстояния и является величиной безразмерной. Для низкочастотных электромагнитных полей численное расстояние принято обозначать через p и называть параметром поля:

$$p = |kr| = 2,81r \sqrt{f|\rho|}, \quad (\text{IX.5})$$

где r выражено в км.

Мы убедились в том, что в постоянных полях величина поля и его направление сложным образом зависят от свойств геоэлектрического разреза, типа источника поля и положения точки наблюдения; в переменных электромагнитных полях такая зависимость существует для амплитуды, фазы и ориентировки магнитного и электрического полей. Не останавливаясь на характере этой зависимости, которая очень сложна и будет рассмотрена ниже для простейших случаев, отметим, что различные пространственные компоненты электромагнитного поля в электрически неоднородной среде могут иметь различный фазовый угол.

На рис. 166 изображены два вектора A_1 и A_2 , имеющие различную амплитуду и фазу, но меняющиеся с одинаковой частотой ω :

$$A_1 = |A_1| \cos(\omega t + \varphi_1), \quad A_2 = |A_2| \cos(\omega t + \varphi_2).$$

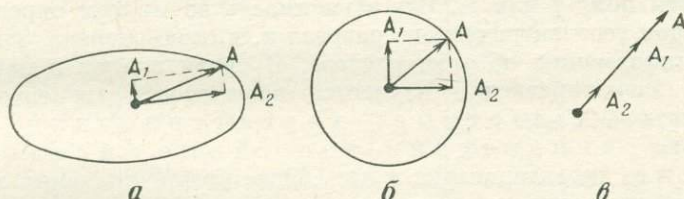


Рис. 166. Эллиптическая поляризация поля.

a — общий случай; поляризация; *б* — круговая, *в* — линейная.

В любой момент времени результирующий вектор A является геометрической суммой обоих векторов. Вследствие различия фаз векторов A_1 и A_2 ориентировка результирующего вектора A меняется со временем.

Изменение суммарного вектора A со временем характеризуется кривой, описываемой концом вектора в пространстве в течение полного периода. Можно доказать, что в общем случае эта кривая является эллипсом, причем величина осей эллипса и их ориентировка в пространстве могут быть определены, если известны ориентировка, амплитуда и фаза векторов A_1 и A_2 .

Эллипс, представляющий собой траекторию конца вектора, носит название эллипса поляризации, а само поле — эллиптически поляризованного. Степень эллиптической поляризации поля определяется эксцентриситетом эллипса поляризации. Если составляющие поля сдвинуты по фазе на 90° , перпендикулярны друг к другу и равны по величине, эллипс поляризации превращается в окружность (т. е. его эксцентриситет равен нулю). Если одна из компонент вектора A_1 или A_2 становится равной нулю или обе эти компоненты совпадают по направлению, эллипс превращается в прямую (его эксцентриситет становится равным единице). Три типа поляризации электрического поля изображены на рис. 166.

У дневной поверхности, т. е. на границе проводящей и непроводящей сред, электрический ток направлен параллельно границе.

Это относится к любым пространственным составляющим вектора плотности тока. Таким образом, у дневной поверхности эллипс поляризации вектора \mathbf{j} лежит в плоскости границы воздух — земля. Отметим, что в изотропной среде этот эллипс совпадает с эллипсом поляризации вектора \mathbf{E} , что непосредственно следует из соотношения между векторами \mathbf{E} и \mathbf{j} :

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}.$$

Эллипс поляризации магнитного поля в точках дневной поверхности может располагаться в любой, в том числе и в вертикальной плоскости.

Элементы, характеризующие электрическую и магнитную составляющие поля (амплитуда, частота, эллиптичность и др.), зависят от частоты поля f или ω . Эта зависимость во многом определяется характером геоэлектрического разреза и, в свою очередь, заключает в себе информацию об этом разрезе. В связи с этим в некоторых методах электроразведки изучается зависимость элементов поля от частоты — частотные характеристики поля. Различают амплитудно-частотные, фазово-частотные характеристики и др. Общее уравнение таких характеристик можно записать в следующем виде:

$$A = F(f),$$

где A — элемент, характеризующий поле (частота, фаза и др.).

§ 2. ПОНЯТИЕ О НЕУСТАНОВИВШИХСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В некоторых методах электроразведки первичное поле возбуждается при помощи заземленных или незаземленных источников, в которых питающий ток изменяется ступенчато, т. е. по следующему закону: при $t \leq 0$ $I > 0$; при $t \geq 0$ $I = 0$.

Магнитное и электрическое поля, создаваемые такими источниками в проводящих средах при $t < 0$, постоянны, а после выключения тока исчезают не сразу, а постепенно в результате весьма сложного процесса, который принято называть переходным процессом или процессом становления поля (рис. 167, а). Детали этого процесса мы рассмотрим ниже для некоторых простейших случаев. Переходные процессы возникают не только при выключении тока в питающем контуре, но и при его включении (рис. 167, б).

Характер неустановившихся электромагнитных полей, т. е. их величина и зависимость от времени, существенно зависит от строения геоэлектрического разреза. На этой зависимости основываются некоторые методы электроразведки.

Зависимость поля от времени описывается переходными характеристиками, общее уравнение которых можно записать так:

$$A = \Phi(t),$$

где A — некоторый элемент поля (E , H , j или др.).

Следует иметь в виду, что в линейных системах, к которым принадлежит геоэлектрический разрез, все элементы, характеризующие электромагнитное поле, связаны с током в возбуждающем поле устройстве прямопропорциональной зависимостью. Для таких систем между частотной характеристикой какого-либо элемента поля

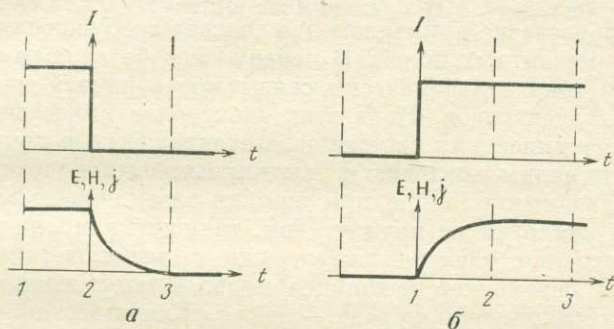


Рис. 167. Переходный процесс.

a — при включении тока в питающем устройстве: $1-2$ — стационарное поле, $2-3$ — нестационарное поле (переходный процесс); b — при включении тока в питающем устройстве: $1-2$ — нестационарное поле (переходный процесс), $2-3$ — стационарное поле.

$A = f(\omega)$ и его переходной характеристикой $A = \Phi(t)$ имеется однозначная связь, определяемая интегралом Фурье:

$$\Phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega) e^{-i\omega t} d\omega. \quad (\text{IX.6})$$

Пользуясь приведенным выше выражением, частотную характеристику любой компоненты поля можно пересчитать в переходную. Из этого, однако, не следует, что при помощи методов переменного поля, использующих гармонические поля, можно получить практически одинаковую с методами нестационарных полей информацию об геоэлектрическом разрезе. В некоторых случаях оказывается выгодным при полевых измерениях непосредственно изучать частотные характеристики, а в других — переходные. Практические пересчеты одних в другие неизбежно связаны с ошибками и частичной потерей информации.

Существует два основных способа возбуждения нестационарных полей. Первый из них характеризуется тем, что поле возбуждается единичным резким (например, ступенчатым) изменением тока в источнике поля. Второй способ заключается в возбуждении первичного

поля сериями периодически следующих друг за другом импульсов тока в источнике поля. Исследуются переходные процессы после каждого импульса. Периодически импульсное возбуждение поля позволяет при измерении переходных процессов использовать принцип накопления полезного сигнала и тем самым способствует повышению помехоустойчивости измерительного устройства.

§ 3. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

В электроразведке применяют два способа возбуждения переменных электромагнитных полей. В первом способе полюсы источника переменного тока гальванически связывают с землей при помощи заземленных электродов. Поле этих электродов является основной причиной возникновения переменного электрического тока в земле.

Здесь мы видим аналогию с постоянным электрическим полем, также создаваемым в земле при помощи заземленных электродов. Однако эта аналогия не полная. Ток, текущий в проводах, соединяющих источник электрического тока с заземлениями, создает вокруг себя переменное магнитное поле. В этом поле находится проводящая неоднородная среда — земля. Как известно, во всяком проводящем теле, находящемся в переменном магнитном поле, индуцируется э. д. с. и, следовательно, возникает вторичный или индуцированный ток. В земле этот ток носит весьма сложный характер. Поля токов, возбужденных гальванически и индуктивно, накладываются друг на друга.

Второй способ возбуждения переменного электромагнитного поля в земле заключается в том, что на дневной поверхности устанавливают одновитковую или многовитковую рамку и через нее пропускают переменный электрический ток, который создает переменное магнитное поле. В этом поле оказывается проводящая среда — земля, в которой индуцируются вторичные электрические токи. Поле этих токов (электрическое или магнитное) исследуется на дневной поверхности.

В тех методах электроразведки, в которых исследуют электромагнитные поля радиоволновых частот, замкнутая рамка может быть заменена открытым излучающим контуром — вертикальной (штыревой) или горизонтальной антеннами.

В некоторых методах индуктивное возбуждение поля производится при помощи одиночных витков провода больших размеров (сотни метров и единицы километров в поперечнике), обтекаемых переменным током.

Индуктивное возбуждение поля имеет принципиальные преимущества при решении некоторых геологических задач (они будут рассмотрены ниже).

Техническим преимуществом индуктивных способов возбуждения переменных токов в земле является отсутствие заземлений

в питающей установке. Это особенно существенно при работе в зимнее время, когда очень трудно заземлять электроды в плохо проводящий слой мерзлоты, а также при работе в горных условиях при отсутствии проводящих рыхлых отложений, в которые можно заземлять электроды.

Электромагнитное поле в каждой точке среды характеризуется двумя величинами — напряженностью электрического поля E и напряженностью магнитного поля H . Каждая из этих двух величин определяется, с одной стороны, положением и формой источников поля и его частотой, а с другой — свойствами той среды, в которой действует это поле. Изучение величин E и H в отдельности, а также определение соотношения этих компонент поля могут дать материал для суждения о геоэлектрическом разрезе исследуемого участка земной коры.

Напряженность H переменного магнитного поля в электроразведке измеряют при помощи индукционной рамки, помещенной в это поле.

Остановимся подробнее на этом методе.

Пусть в переменном магнитном поле, меняющемся по закону косинуса $H = H_0 \cos \omega t$, помещен плоский замкнутый виток провода так, что плоскость его перпендикулярна к вектору H (рис. 168, а). В этом витке будет индуцироваться переменная электродвижущая сила e , величина которой в вольтах согласно закону Фарадея равна одной стотысячной части того числа силовых линий, на которое изменяется в одну секунду поток магнитного поля через площадь, ограниченную витком, т. е.

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (\text{IX.7})$$

где Φ — магнитный поток через площадь S витка:

$$\Phi = SH_0 \cos \omega t.$$

Таким образом,

$$e = -d(SH_0 \cos \omega t)/dt = SH_0 \omega \sin \omega t.$$

Заменяв $\sin \omega t$ на $\cos(\omega t - 90^\circ)$, получим

$$e = SH_0 \omega \cdot 10^{-8} \cos(\omega t - 90^\circ).$$

Обозначив $SH_0 \omega \cdot 10^{-8}$ через e_0 , в окончательном виде найдем

$$e = e_0 \cos(\omega t - 90^\circ). \quad (\text{IX.8})$$

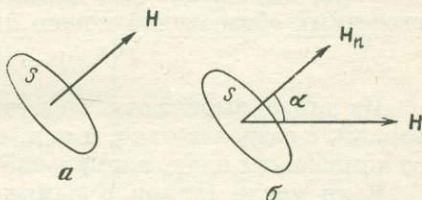


Рис. 168. Виток в переменном магнитном поле.

Если виток расположен так, что нормаль к его плоскости составляет с вектором \mathbf{H} угол α (рис. 168, б), то магнитный поток Φ через площадь S витка будет

$$\Phi = SH_n;$$

здесь H_n — составляющая вектора напряженности магнитного поля, нормальная к плоскости витка:

$$H_n = H \cos \alpha = H_0 \cos \alpha \cos \omega t.$$

В последнем выражении амплитудное значение компоненты вектора напряженности магнитного поля, перпендикулярного к плоскости витка, $H_0 \cos \alpha$ обозначим через H_{0n} .

Тогда выражение для магнитного потока через виток с учетом введенных обозначений можно написать

$$\Phi = H_{0n} \cos \omega t.$$

Из этого выражения следует, что амплитудное значение вектора Φ , а следовательно, и э. д. с., наводимая в витке, зависят лишь от компоненты поля, нормальной к плоскости витка.

Если число витков в рамке равно n , то вследствие сложения э. д. с., наведенных в отдельных витках, амплитудное значение э. д. с. ее на выходе рамки \mathcal{E}_0 будет увеличено в n раз, т. е.

$$\mathcal{E}_0 = n e_0, \quad (\text{IX.9})$$

а полное значение э. д. с. на зажимах рамки будет равно

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t - 90^\circ) \quad (\text{IX.10})$$

Таким образом, мы показали, что амплитудное значение э. д. с., наведенной в рамке, прямо пропорционально амплитудному значению компоненты напряженности магнитного поля, перпендикулярной к плоскости витков рамки, а фаза этой э. д. с. отстает на 90° от фазы магнитного поля. Указанное обстоятельство позволяет применить рамку для измерения магнитного поля.

При измерении переходных процессов в магнитном поле э. д. с., наведенная в измерительной рамке, согласно (IX.8), пропорциональна скорости изменения поля со временем (первой производной от H по t).

При измерении магнитного поля к зажимам рамки подключают прибор, измеряющий э. д. с. на выходе рамки. Обычно в качестве такого прибора применяют ламповые либо транзисторные вольтметры. Показания вольтметра пропорциональны амплитудному значению напряженности магнитного поля по направлению, перпендикулярному к плоскости витков рамки. В некоторых случаях измеряют также фазы наведенных в рамке э. д. с.

Напряженность переменного электрического поля в земле, так же как и при электроразведке постоянным током, определяют при помощи двух электродов, заземленных в точках, между которыми нужно измерить переменную разность потенциалов. К электродам

подключают какое-либо измерительное устройство, рассчитанное на переменный ток, — компенсатор переменного тока или микро-вольтметр.

Разность потенциалов, измеренная этим устройством и отнесенная к расстоянию между электродами, т. е. $\Delta U/r$, приближенно равна напряженности электрического поля в центре отрезка между измерительными электродами.

§ 4. НОРМАЛЬНЫЕ ПОЛЯ

Нормальное поле плоской электромагнитной волны. Под плоской электромагнитной волной понимается такое переменное электромагнитное поле, все элементы которого (H , E , j и др.) изменяются по гармоническому закону и в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны, не зависят от координат точки. Так, например, в прямоугольной системе координат, ось z которой совпадает с направлением распространения волны (рис. 169), в любой плоскости, перпендикулярной к оси z , величина электрического и магнитного полей постоянна.

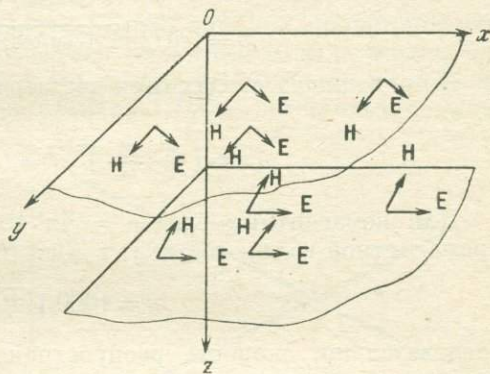


Рис. 169. Плоская электромагнитная волна.

Напряженность электрической и магнитной составляющих поля плоской волны, распространяющейся в направлении оси z , определяется следующими выражениями:

$$E_x = E_{x0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{0x}),$$

$$E_y = E_{y0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{0y}),$$

$$H_x = H_{x0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \psi_{0x}),$$

$$H_y = H_{y0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \psi_{0y});$$

здесь E_{x0} , E_{y0} , H_{x0} и H_{y0} — постоянные множители, зависящие от мощности источника поля; φ_{0x} , φ_{0y} , ψ_{0x} и ψ_{0y} — постоянные сдвиги фаз, не зависящие от координаты z .

Предположим, что некоторая точка перемещается вдоль оси z так, что за время Δt ее координата изменяется на Δz ; тогда фаза любой компоненты поля изменится на величину

$$a \Delta z - \omega \Delta t.$$

Найдем ту скорость, с которой необходимо перемещать точку вдоль оси z , чтобы фаза поля в этой точке не менялась. Очевидно, для этого следует предположить, что

$$a \Delta z - \omega \Delta t = 0;$$

отсюда

$$\Delta z / \Delta t = \omega / a.$$

Эта величина получила название фазовой скорости (или просто скорости) распространения волны:

$$v = \omega / a. \quad (\text{IX.11})$$

Учитывая приведенное выше выражение для a , можно написать

$$v = \left\{ \varepsilon \mu / 2 \left[1 + (\gamma / \omega \varepsilon)^2 + 1 \right] \right\}^{-1/2}. \quad (\text{IX.12})$$

В проводящих средах при достаточно низких частотах $\gamma / \omega \varepsilon \gg 1$, т. е.

$$v = \left(\frac{\varepsilon \mu}{2} \frac{\gamma}{\omega \varepsilon} \right)^{-1/2} = \left(\frac{\mu}{4 \pi f \rho} \right)^{-1/2}.$$

Для немагнитных сред $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; тогда скорость электромагнитной волны составит в м/с:

$$v = 1000 \sqrt{10 f \rho}; \quad (\text{IX.13})$$

следовательно, скорость распространения волны пропорциональна квадратному корню из сопротивления среды и частоты поля.

Длина волны λ в метрах определяется произведением периода на скорость:

$$\lambda = vT = v/f = 1000 \sqrt{10 \rho / f} = 1000 \sqrt{10 \rho T}. \quad (\text{IX.14})$$

Отметим, что приведенные формулы для скорости распространения плоской волны и ее длины справедливы и для волн более сложного типа — сферических, цилиндрических и др.

Характерной особенностью выражений для амплитуд поля плоской волны является наличие множителя $e^{-\alpha z}$, определяющего убывание амплитуды по мере распространения волны в положительном направлении оси z .

Физический смысл этого поглощения заключается в расходовании энергии поля на нагревание среды. Интенсивность поглощения определяется постоянной b , вследствие чего эта величина получила название коэффициента поглощения.

Из выражения (IX.3) следует, что коэффициент поглощения растет с увеличением частоты поля. В области очень высоких частот коэффициент b практически достигает предельного значения.

Коэффициент поглощения возрастает с увеличением проводимости горных пород. В непроводящих средах он равен нулю.

Введем понятие о глубине проникновения электромагнитного поля¹ τ . Под этой величиной мы будем понимать то расстояние, на котором вследствие поглощения амплитуды поля уменьшаются в e раз. Согласно этому определению, например, для электрической компоненты поля E_x

$$\omega \frac{\mu}{C} |C_x| e^{-bz} / \omega \frac{\mu}{C} |C_x| e^{-b(z+\tau)} = e$$

или

$$1/e^{-b\tau} = e.$$

Взяв натуральный логарифм от обеих частей, получим

$$b\tau = 1, \quad \text{т. е. } \tau = 1/b. \quad (\text{IX.15})$$

На рис. 170 показан график зависимости b и τ от отношения частоты поля к сопротивлению среды.

На этом графике видно, например, что глубина проникновения электромагнитного поля, меняющегося с частотой 10 кГц, в однородную среду с сопротивлением 100 Ом·м ($f/\rho = 100$) равна 50 м. Снижение частоты вдвое при тех же условиях ($f/\rho = 50$) приведет к увеличению глубины проникновения поля до 70,5 м и т. д.

Глубина проникновения и коэффициент поглощения электромагнитного поля являются очень важными в электроразведке параметрами, поскольку они в значительной степени определяют глубину методов электроразведки переменными полями.

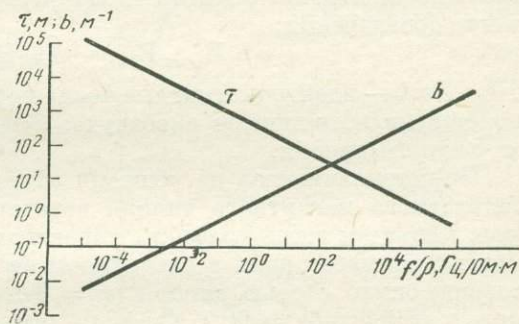


Рис. 170. Зависимость глубины проникновения электромагнитного поля τ и коэффициента поглощения поля b от отношения f/ρ .

Нормальное поле горизонтального магнитного

диполя. В некоторых методах электроразведки в качестве источника переменного электромагнитного поля применяют многовитковую рамку небольших размеров, обтекаемую переменным током. Если плоскость витков такой рамки расположена вертикально, то поле ее в точках, расположенных на расстояниях, значительно превышающих диаметр рамки, совпадает с полем гармонически меняющегося магнитного диполя, ось которого перпендикулярна к плоскости витков, т. е. горизонтальна, а момент M меняется по гармоническому закону:

$$M = M_0 \cos \omega t.$$

В свою очередь M_0 определяется соотношением

$$M_0 = 0,1nSI,$$

¹ Иногда эту величину называют толщиной скин-слоя.

где n — число витков в рамке; S — площадь витка; I — амплитуда силы тока. Такую рамку принято называть горизонтальным магнитным диполем.

Амплитуда магнитного и электрического полей гармонически меняющегося магнитного диполя, находящегося в непроводящей среде (в воздухе), определяется следующими выражениями:

$$H_0 = M/r^3, \quad E_0 = -\frac{i\omega}{c} \frac{M}{r^2}. \quad (\text{IX.16})$$

Фаза электрического поля сдвинута на 90° относительно магнитного поля.

Если переменный магнитный диполь расположен на поверхности однородного проводящего полупространства, то это полупространство существенно усложняет характер поля и приведенные выше выражения для H_0 и E_0 оказываются несправедливыми.

Для характеристики нормальных полей различных источников удобно пользоваться безразмерными величинами, равными отношению нормального поля этих источников к полю в воздухе и называемыми электромагнитными числами. В нашем случае введем следующие обозначения:

$$e = E_{н, м} / E_{0м}, \quad h = H_{н, м} / H_{0м}; \quad (\text{IX.17})$$

здесь e и h — электромагнитные числа нормального поля; $E_{0м}$ и $H_{0м}$ — поле магнитного диполя в воздухе; $E_{н, м}$ и $H_{н, м}$ — нормальное поле магнитного диполя.

Не останавливаясь на решении задачи о нормальном поле горизонтального магнитного диполя вследствие сложности этого решения, приведем здесь графики, характеризующие поведение электромагнитных чисел поля в зависимости от параметра p , для профиля, совпадающего с осью диполя ($\varphi = 0$), и профиля, перпендикулярного к этой оси ($\varphi = 90^\circ$). Графики (рис. 174) рассчитаны для случая, когда токи смещения малы по сравнению с токами проводимости.

Характерные особенности нормального поля горизонтального магнитного диполя заключаются в следующем.

В точках, лежащих на оси диполя ($\varphi = 0$), магнитное поле имеет горизонтальную (h_φ) и вертикальную (h_z) компоненты. В точках дневной поверхности, лежащих в экваториальной плоскости диполя (т. е. в плоскости витков рамки), поле направлено горизонтально (H_φ).

Зависимость нормального поля от параметра $p = 2,81r \sqrt{\frac{f}{\rho}}$ имеет сложный характер и различна для различных компонент поля. Наряду с этим можно выделить общую для всех графиков особенность, заключающуюся в том, что наиболее интенсивно поле диполя меняется при увеличении параметра p от 2 до 7. При стремлении параметра p к нулю (т. е. при снижении частоты или увеличении сопротивления среды) поле магнитного диполя стремится к полю в воздухе. Если параметр p не превышает 0,9, нормальное поле отличается от поля в воздухе не более чем на 5%. Из приведенного выше следует, что в том случае, когда поле магнитного диполя иссле-

дуются с целью решения задач геологического картирования, частота поля и расстояние между точками измерения и центром диполя должны выбираться такими, чтобы выдерживалось следующее приближенное соотношение: $2 < \sqrt{\frac{f}{\rho}} r < 7$, т. е. $0,8 < \sqrt{\frac{f}{\rho}} r < 2,5$.

В том случае, когда магнитный диполь применяется в методах, предназначенных для прямых поисков хорошо проводящих объектов (см. гл. XIII), т. е. когда необходимо в максимальной степени освободиться от аномалий за счет вмещающей среды, желательно, чтобы $p < 0,9$, т. е. $\sqrt{fr/\rho} < 0,3$.

Нормальное поле вертикального магнитного диполя. Нормальное поле вертикального магнитного диполя (горизонтальной рамки), расположенного на поверхности однородного полупространства, в точках этой поверхности имеет две составляющие: радиальную H_r и вертикальную H_z . Графики магнитных чисел этих составляющих для профиля, проходящего через ось диполя, изображены на рис. 172.

Из этих составляющих радиальная имеет чисто аномальный характер, т. е. она вызвана токами, индуцированными в земле первичным полем диполя. Суммарное магнитное поле диполя лежит в меридиональной плоскости, проходящей через ось диполя. Это поле эллиптически поляризовано. Это следует из того, что составляющие H_r и H_z имеют различные фазы (см. рис. 172).

Электрическое поле вертикального диполя имеет только ϕ -компоненту, т. е. направлено по касательной к окружности, проходящей через данную точку и имеющей центр на оси диполя. Графики электрических чисел электрической составляющей поля приведены на рис. 172.

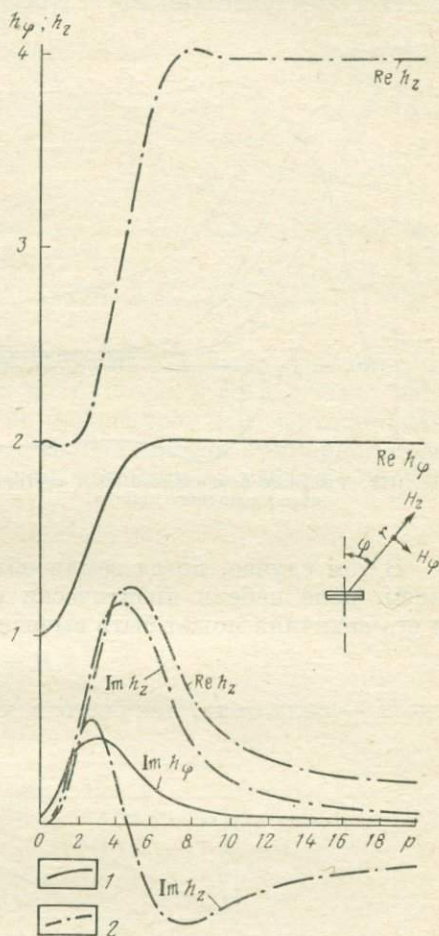


Рис. 171. Графики нормального поля горизонтального магнитного диполя.
1 — $\phi = 90^\circ$; 2 — $\phi = 0$.

Нормальное поле горизонтального электрического диполя. Электрический диполь представляет собой элементарный заземленный на концах отрезок линейного проводника, через который течет переменный электрический ток. Если этот отрезок имеет длину dl , а сила тока в нем равна I , то момент диполя равен Idl .

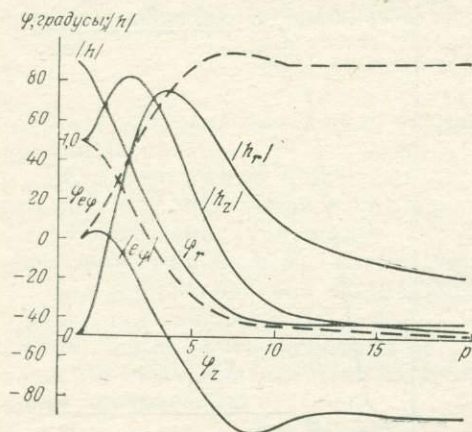


Рис. 172. Графики нормального поля вертикального магнитного диполя.

В том случае, когда земля обладает очень высоким сопротивлением, поле кабеля практически не отличается от поля в воздухе и его величина может быть вычислена по закону Био-Савара:

$$H = 2I/r,$$

где I — сила тока, текущего в кабеле; r — расстояние до кабеля.

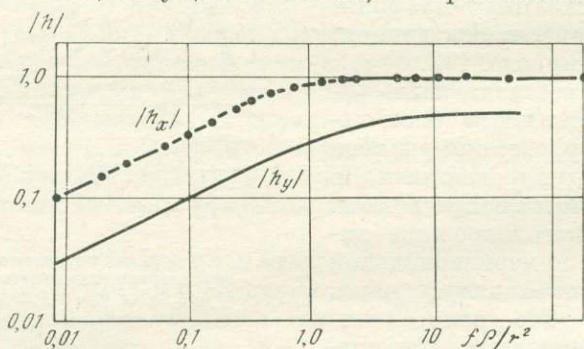


Рис. 173. Графики нормального поля горизонтального электрического диполя.

В точках дневной поверхности поле кабеля имеет только вертикальную компоненту.

Если породы обладают конечным сопротивлением, то в них индуцируются вторичные токи, текущие при условии однородности

среды параллельно кабелю. Магнитное поле этих токов накладывается на первичное поле и усложняет его. Не приводя здесь расчетных формул, имеющих очень сложный вид, приведем графики, характеризующие поведение нормального поля прямолинейного кабеля в зависимости от параметра p (рис. 174) на профиле, перпендикулярном к кабелю.

Из приведенных графиков следует, что нормальное магнитное поле кабеля имеет две компоненты — вертикальную и горизонтальную. По мере удаления от кабеля горизонтальная компонента поля возрастает, достигает максимума и затем также убывает, но медленнее, чем вертикальная компонента поля. Вследствие этого вблизи кабеля суммарное поле вертикально, а на достаточно большом удалении от кабеля — почти горизонтально.

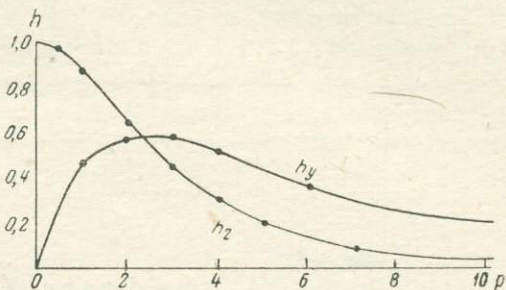


Рис. 174. Графики нормального поля прямолинейного бесконечно длинного кабеля.

Глава X

МЕТОДЫ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Под магнитотеллурическим полем в дальнейшем мы будем понимать переменную составляющую естественного электромагнитного поля Земли.

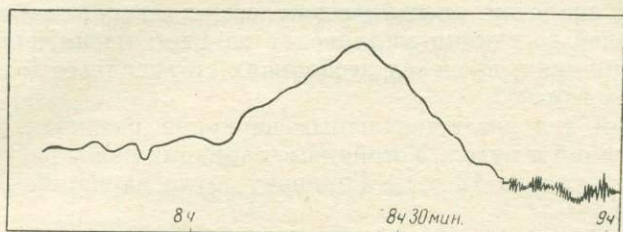
Эта переменная составляющая в свою очередь может рассматриваться как сумма переменных электромагнитных полей различного происхождения, различающихся по интенсивности, характеру зависимости от времени, площади распространения и т. п.

Для геофизиков наибольший интерес представляют магнитотеллурические поля регионального характера, захватывающие колоссальные объемы Земли и приземного пространства. Происхождение этих полей в настоящее время связывают с воздействием на ионосферу Земли потока заряженных частиц, посылаемых Солнцем. Попадая в постоянное магнитное поле Земли, этот поток фокусируется в приполярных областях и возмущает равновесное состояние ионизированных газов в ионосфере. Сложные токовые системы, возникающие при этом в ионосфере, служат источниками вторичного электромагнитного поля, накладывающегося на постоянное электромагнитное поле Земли.

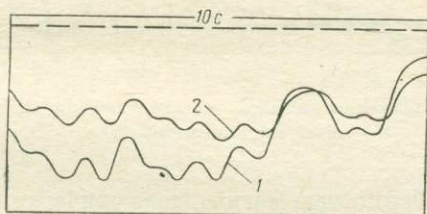
Связь магнитотеллурического поля Земли с солнечным излучением хорошо подтверждается соответствием между одиннадцатилетней периодичностью пятнообразования на солнце и такой же периодичностью изменений среднегодовых значений напряженности магнитотеллурического поля. Удаленность токовых вихрей в ионосфере от поверхности Земли хорошо согласуется с региональным характером магнитотеллурического поля.

Зависимость магнитотеллурического поля от времени имеет очень сложный характер. Наряду с непериодическими возмущениями поля можно выделить гармонические составляющие, характеризующиеся более или менее устойчивыми периодами. Наиболее длинно-периодные вариации магнитотеллурического поля, именуемые б у х -

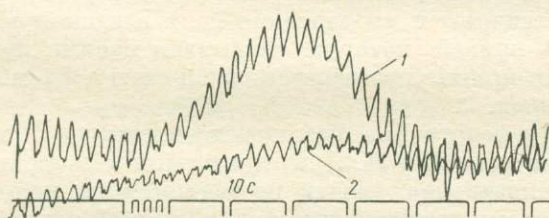
тами, имеют период, измеряемый десятками минут и более (рис. 175, а). С другой стороны, в спектре магнитотеллурического поля присутствуют высокочастотные составляющие с периодом от десятых до тысячных долей секунды. Для геофизиков наибольший интерес представляют среднепериодные вариации,



а



б



в

Рис. 175. Типы вариаций магнитотеллурического поля.
а — бухты; б — среднепериодные вариации: 1 — меридиональная составляющая E , 2 — широтная составляющая H ; в — высокочастотные вариации: 1 — широтная составляющая E , 2 — меридиональная составляющая E .

имеющие период от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Осциллограмма среднепериодных вариаций электрической и магнитной составляющих магнитотеллурического поля изображена на рис. 175, б.

Амплитуда среднепериодных вариаций изменяется со временем. По характеру этих изменений выделяют устойчивые вариации, продолжающиеся в течение нескольких часов, причем в течение этого времени амплитуда поля незакономерно и обычно плавно изменяется, а также изменяются дуги вариаций — серии, состоящие

из нескольких импульсов поля и разделенные периодом относительного покоя.

Амплитуда среднепериодных вариаций различна в различных районах земного шара. В целом интенсивность магнитотеллурического поля возрастает с увеличением широты точки наблюдения. В средних широтах электрическая составляющая колеблется от десятых долей до единиц милливольт на 1 км; магнитная составляющая изменяется в пределах нескольких сотых долей эрстеда (нескольких гамм).

Суточный ход среднепериодных вариаций различен для устойчивых вариаций и цугов. Устойчивые вариации наиболее интенсивны в период с нуля до 12 ч по Гринвичу, цуги вариаций — в период с 12 до 24 ч.



Рис. 176. Поляризация векторов магнитотеллурического поля. а — линейная; б — нелинейная.

Характерной особенностью магнитотеллурического поля является то, что векторы E и H этого поля меняются в данной точке не только по величине, но и по направлению.

Изменение величины и направления поля в данной точке можно характеризовать кривой, которую описывают своими концами векторы E и H . Эти кривые называются годографами соответствующих векторов.

По характеру годографов различают линейную и нелинейную поляризацию векторов E и H . При линейной поляризации и напряженность поля почти не меняется по направлению и соответственно этому годограф имеет вид прямой или сложной фигуры, вытянутой по какому-либо направлению (рис. 176, а). При нелинейной поляризации годограф имеет изомерный характер, что отражает изменение не только величины, но и направления векторов E или H со временем (рис. 176, б).

§ 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Источником региональных магнитотеллурических полей, как указывалось выше, являются токи в ионосфере, возбужденные корпускулярным излучением Солнца. Электромагнитные волны, излучаемые этими токами, имеют очень сложные фронты, определяемые распределением токов в пространстве и их интенсивностью. Однако, учитывая, что магнитотеллурические поля изучаются в точках дневной поверхности, удаленных от токов в ионосфере на очень

большие расстояния, и линейные размеры исследуемых площадей невелики по сравнению с этими расстояниями, магнитотеллурическое поле в пределах исследуемой площади может рассматриваться как плоская электромагнитная волна, падающая на поверхность земли под некоторым углом, зависящим от положения изучаемой площади и электрического состояния ионосферы в данный момент.

На поверхности земли электромагнитная волна испытывает преломление (рис. 177). В соответствии с законом преломления электромагнитных волн

$$\sin e / \sin d = v_B / v_3,$$

где v_B и v_3 — скорости распространения электромагнитной волны в воздухе и в земле.

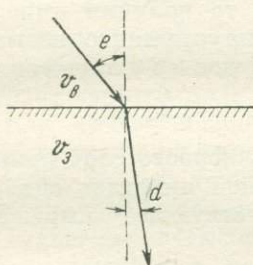


Рис. 177. Преломление электромагнитной волны у поверхности земли.

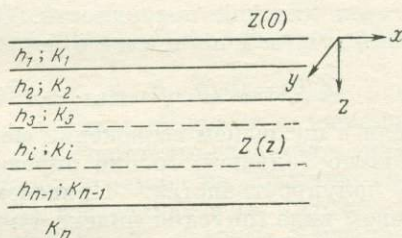


Рис. 178. Пояснение к расчету поля плоской волны в горизонтально-слоистой среде.

Учитывая, что электрическое сопротивление воздуха бесконечно велико, а земля имеет конечное значение ρ , в соответствии с формулой (IX.14) можно записать $v_B \gg v_3$; отсюда следует, что $d = 0$, т. е. преломленная волна уходит в землю под прямым углом к поверхности земля — воздух. Таким образом, теория методов магнитотеллурического поля должна основываться на изучении особенностей плоской волны, распространяющейся в электрически неоднородной среде в вертикальном направлении. Расчеты полей плоской волны в неоднородных средах очень сложны и выполнены главным образом для горизонтально-слоистых сред.

Пусть на поверхность горизонтально-слоистой среды падает плоская электромагнитная волна (рис. 178). Будем полагать, что векторы напряженности электрической и магнитной составляющих поля поляризованы линейно.

Согласно сказанному выше эти векторы расположены в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. Если введем прямоугольную систему координат, ось z которой совпадает с направлением распространения волны, а ось x — с направлением вектора E , то электромагнитное поле будет иметь две взаимно перпендикулярные компоненты — E_x и H_y , каждая из которых будет зависеть только от координаты z . Отношение этих компонент

поля называют импедансом, или волновым сопротивлением разреза и обычно обозначают через Z^1 :

$$Z = E_x / H_y.$$

Импеданс слоистого разреза зависит от мощности h_i и волновых чисел k_i горизонтов, слагающих этот разрез, от частоты поля ω , а также от координаты z вдоль оси, совпадающей с направлением распространения волны:

$$Z(z) = \Phi(h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}; k_1, k_2, k_3, \dots, k_n; \omega). \quad (X.1)$$

В зависимость указанного типа входят известные функции, и поэтому имеется практическая возможность для расчета импеданса по заданным параметрам разреза, частоте поля и координате z точки.

Если в выражении (X.1) примем $z = 0$, то получим импеданс для точек дневной поверхности. Эту величину принято называть входным импедансом:

$$Z(0) = \Phi(h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}; k_1, k_2, k_3, \dots, k_n; \omega). \quad (X.2)$$

Если в последнем выражении мощность h_1 первого слоя принять бесконечно большой, то оно определит входной импеданс однородного полупространства. Приведем соответствующее выражение в готовом виде (опуская индекс 1):

$$Z(0) = -i\omega\mu/k. \quad (X.3)$$

Учитывая, что речь идет о полях очень низкой частоты, т. е.

$$k^2 = i\omega\mu\gamma,$$

выражение (X.3) можно представить в следующем виде:

$$Z(0) = -i\omega\mu / \sqrt{i\omega\mu\gamma}.$$

Или, учитывая, что для немагнитных сред $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, из последнего выражения после несложных преобразований получим:

$$|Z(0)|^2 = |E_x|^2 / |H_y|^2 = \rho / 0,2T; \quad (X.4)$$

здесь E_x выражено в мВ/км; H_y — в гаммах; T — в с; ρ — в Ом·м.

Из выражения (X.4) следует, что

$$\rho = 0,2T |Z(0)|^2. \quad (X.5)$$

Таким образом, по измеренному на дневной поверхности входному импедансу можно вычислить удельное сопротивление однородного полупространства.

В том случае, когда нижнее полупространство неоднородно, величина, вычисленная по формуле (X.5), лишь по размерности совпадает с удельным сопротивлением. По существу эта величина

¹ Поскольку E имеет размерность В/м, а H — А/м, то размерность Z — В/м : А/м = Ом.

сложным образом зависит от характера геоэлектрического разреза, частоты поля и точки наблюдения. Эту величину принято называть кажущимся сопротивлением и обозначать ρ_T :

$$\rho_T = 0,2T |Z(0)|^2. \quad (X.6)$$

Для случая горизонтально-слоистого разреза выражение для ρ_T можно получить, если в формулу (X.6) подставить $|Z(0)|$ из формулы (X.2).

Зависимость ρ_T от характера геоэлектрического разреза используется для изучения геологического строения исследуемой площади.

§ 3. МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Сущность этого способа изучения магнитотеллурического поля заключается в исследовании зависимости ρ_T или входного импеданса $Z(0)$ от частоты поля.

Как указывалось в гл. IX, глубина проникновения электромагнитного поля зависит от его частоты и растет с уменьшением частоты. С этой точки зрения низкочастотные составляющие магнитотеллурического поля проникают в Землю на большую глубину по сравнению с высокочастотными составляющими. Соответственно этому зависимость входного импеданса от частоты характеризует изменение электрического строения геологического разреза в вертикальном направлении. Изучение зависимости входного импеданса или ρ_T от частоты поля получило название магнитотеллурического зондирования (МТЗ).

Процесс магнитотеллурического зондирования заключается в том, что в исследуемой точке дневной поверхности при помощи специальной аппаратуры осциллографируют взаимно перпендикулярные компоненты электрического и магнитного полей.

По полученным осциллограммам определяют амплитуды вариаций магнитотеллурического поля различной частоты в диапазоне T от сотых долей секунды до нескольких минут и затем значение входного импеданса $Z(0)$. От входного импеданса при помощи выражения (X.6) переходят к параметру ρ_T .

График зависимости этого параметра от \sqrt{T} , построенный в двойном логарифмическом масштабе, представляет собой кривую магнитотеллурического зондирования.

Количественную интерпретацию кривых магнитотеллурического зондирования выполняют путем сравнения наблюдаемых в поле кривых с теоретическими кривыми, построенными также в двойном логарифмическом масштабе. По оси ординат при построении теоретических кривых откладывают ρ_T/ρ_1 , а по оси абсцисс — длину волны в первом слое, отнесенную к мощности этого слоя, т. е. λ_1/h_1 .

Палетка трехслойных кривых МТЗ для разреза типа Н изображена на рис. 179.

Характерной особенностью кривых для разрезов типа Н с опорным горизонтом бесконечно высокого сопротивления является наличие прямолинейной асимптоты, наклоненной к оси абсцисс под углом $63^{\circ} 25'$. Эта асимптота пересекает ось палетки $\rho_T = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в точке с абсциссой $\sqrt{T} = 0,0028 S$.

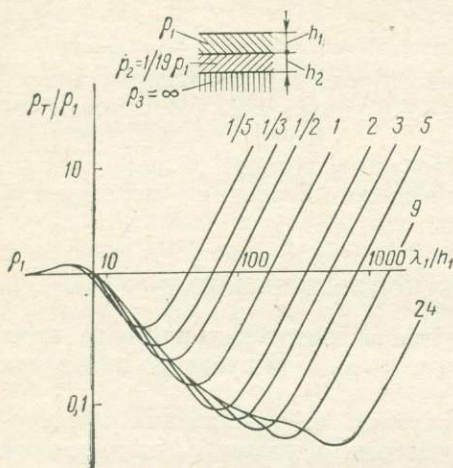


Рис. 179. Палетка трехслойных кривых МТЗ типа Н.

Преимущество магнитотеллурического зондирования — возможность изучения опорных электрических горизонтов при наличии в надопорной толще пластов пород, обладающих высоким удельным сопротивлением. Такие горизонты (экраны) препятствуют проникновению постоянного поля на глубину и, таким образом, не позволяют практически применять зондирование на постоянном токе для решения задач картирования опорного горизонта. Непроводящие экраны не являются препятствием для электромагнитной волны и обуславливают

возможность применения в данном случае МТЗ.

МТЗ выгодно отличается от обычного зондирования отсутствием питающих линий и генераторных установок, что позволяет повысить производительность труда и снизить стоимость полевых работ.

§ 4. МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

При магнитотеллурическом профилировании (МТП) изучают переменную составляющую электромагнитного поля Земли какой-либо постоянной частоты, выбор которой определяется характером решаемой геологической задачи.

Как указывалось выше, частота поля определяет глубину исследования, поэтому глубина исследования при МТП для данного геоэлектрического разреза остается постоянной. Изучая распределение элементов магнитотеллурического поля (E , H или Z) на исследуемой площади при неизменной частоте поля, мы, таким образом, изучаем геоэлектрический разрез этой площади на некоторой глубине, определяемой типом разреза и частотой поля. Здесь мы видим аналогию с электрическим профилированием в постоянном электрическом поле, причем роль разноса питающих электродов играет частота поля.

На рис. 180 изображены две кривые магнитотеллурического зондирования над разрезом с высокоомным опорным горизонтом. Очевидно, что распределение ρ_T или импеданса поля для вариаций

с периодом T_1 не будет отражать рельефа опорного горизонта, так как характер кривых МТЗ на данном участке определяется электрическими свойствами надопорной толщи. Если же исследуется ρ_T или $|Z|$ для вариаций с периодом T_2 , результаты в максимальной мере будут отражать рельеф опорного горизонта. Аналогичный пример можно привести и для разрезов с низкоомным опорным горизонтом. Однако в этом случае период исследуемых вариаций должен соответствовать нисходящим ветвям кривых МТЗ.

В настоящее время по техническим причинам (простота измерений) при магнитотеллурическом профилировании исследуют главным образом среднепериодные вариации поля, соответствующие весьма узкому диапазону периодов — от 10 до 60 с. Приближенные расчеты показывают, что измерение вариаций с таким периодом в районах с высокоомным опорным горизонтом позволяет получить значения ρ_T , относящиеся к восходящей асимптотической ветви кривых МТЗ в том случае, когда мощность надопорной толщи изменяется от нескольких десятков долей до первых единиц километров, а ее среднее продольное удельное сопротивление — от нескольких единиц до нескольких десятков ом-метров. Таким образом, основной и в то же время очень важной в отношении поисков нефтегазоносных структур задачей, решаемой при помощи магнитотеллурического профилирования, является картирование высокоомных опорных горизонтов, перекрытых мощной толщей сравнительно хорошо проводящих пород.

Для случая, когда значение ρ_T соответствует правой асимптоте кривой МТЗ, (зона S), получено простое соотношение, связывающее продольную проводимость надопорной толщи S, входной импеданс $Z(0)$ и сопротивление опорного горизонта:

$$S = 796 (1/|Z(0)| - \sqrt{T/10\rho_n}). \quad (X.7)$$

Из этого выражения следует, что по измеренному входному импедансу можно определить важную структурную характеристику разреза — продольную проводимость надопорной толщи. В простейшем случае линейно поляризованного поля для определения S, очевидно, достаточно измерить две взаимно перпендикулярные компоненты поля — E_x и H_y . Отметим также, что при $\rho_n \rightarrow \infty$

$$S = 796 H_y / E_x. \quad (X.8)$$

При региональных геологоструктурных исследованиях широко применяется модификация магнитотеллурического профилирования, характеризующаяся тем, что в процессе профилирования измеряют

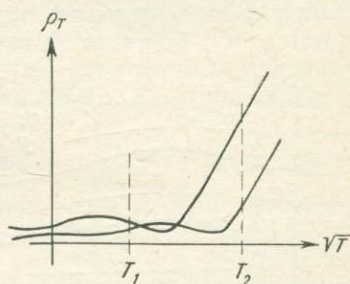


Рис. 180. Выбор частоты для магнитотеллурического профилирования.

только электрическую компоненту магнитотеллурического поля. Эта модификация МТП носит название метода теллурических токов (МТТ).

Пусть на поверхность геологического разреза, который мы для простоты примем неизменяющимся в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа (рис. 181), падает плоская электромагнитная волна, электрическая компонента которой (теллурические токи) лежит в плоскости чертежа, т. е. имеет компоненты E_x и E_z , а магнитная — перпендикулярна к этой плоскости (H_y). Рассмотрим магнитотеллурическое поле в двух точках (p и q), лежащих на оси x . Выделим в окрестностях точек p и q два сечения, перпендикулярных к оси x , в виде прямоугольников с горизонтальной стороной, равной единице, и с бесконечно длинной вертикальной стороной. Нетрудно

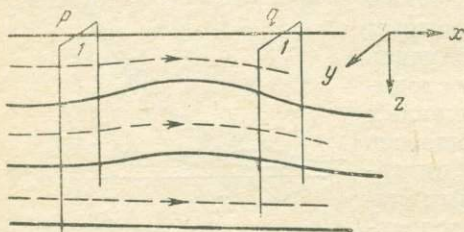


Рис. 181. Теллурические токи в слоистом разрезе.

заметить, что через оба сечения в точках p и q будет протекать один и тот же ток. Это следует, во-первых, из того, что ток течет в плоскостях, параллельных плоскости xOz (нет растекания тока), и, во-вторых, из того, что магнитотеллурическое поле поглощается проводящим разрезом и на достаточно

большой глубине практически равно нулю. Из равенства токов, текущих в обоих сечениях, по закону Ампера следует равенство горизонтальных составляющих поля в точках p и q , т. е. $H_{yp} = H_{yq}$.

Найдем отношения импедансов в точках p и q :

$$Z_p/Z_q = \frac{E_{xp}}{H_{yp}} / \frac{E_{xq}}{H_{yq}}$$

или, учитывая предыдущее равенство,

$$Z_p/Z_q = E_{xp}/E_{xq}.$$

Представляет особый интерес случай, при котором сопротивление опорного горизонта бесконечно велико. Тогда в соответствии с формулой (X.8)

$$Z_p = 796/S_p, \quad Z_q = 796/S_q,$$

т. е.

$$E_{xp}/E_{xq} = S_q/S_p. \quad (\text{X.9})$$

Отношение напряженностей электрической составляющей магнитотеллурического поля в двух точках принято называть теллурическим параметром μ :

$$\mu = E_{xp}/E_{xq}.$$

Таким образом,

$$S_q/S_p = \mu$$

$$S_q = \mu S_p. \quad (\text{X.10})$$

Из выражений (X.9) и (X.10) следует, что по измеренным в двух точках исследуемой площади напряженностям теллурического поля можно определить отношение продольных проводимостей отложений, перекрывающих опорный горизонт бесконечно высокого сопротивления.

Если одну из этих точек сделать неподвижной и называть базисной (точка p), а вторую (точка q) — перемещать по исследуемой площади и называть полевой, то можно определить продольную проводимость надопорной толщи в любой точке исследуемой площади в долях этой величины на базисной точке.

Если сопротивление опорной толщи имеет конечное значение, то в соответствии с формулой (X.7) выражение для теллурупараметра усложняется и приобретает следующий вид:

$$\mu = (S_p/S_q)^m; \quad (\text{X.11})$$

здесь m — поправочный коэффициент, зависящий от отношения ρ_1/ρ_n и практически равный единице при $\rho_n > 2000\rho_1$.

§ 5. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ МЕТОДАМИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Выше при описании основных модификаций методов магнитотеллурического поля предполагалось, что векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} поляризованы линейно. Между тем для природных условий более характерна нелинейная поляризация поля. В этом случае в выражениях (X.7)—(X.9) и других, связывающих напряженность поля с параметрами разреза, под \mathbf{E} и \mathbf{H} следует понимать некоторые осредненные значения напряженности поля. Некоторые приемы такого усреднения будут описаны ниже.

Нелинейная поляризация поля обуславливает необходимость регистрации при полевых измерениях двух взаимно перпендикулярных составляющих поля. В связи с этим датчики электрического поля представляют собой две взаимно перпендикулярные приемные линии — M_1N_1 и M_2N_2 (рис. 182), а датчики магнитного поля — два взаимно перпендикулярных магниточувствительных элемента магнитометра.

Для регистрации поля теллурических токов применяются электроразведочные станции ЭПЛ-57 или СТГ-59, смонтированные на автомашине повышенной проходимости. На этих станциях установлены электроразведочный осциллограф ЭПО-6 или ЭПО-7М, двухканальный автокомпенсатор ЭДА-57, радиостанция и телевыключатель.

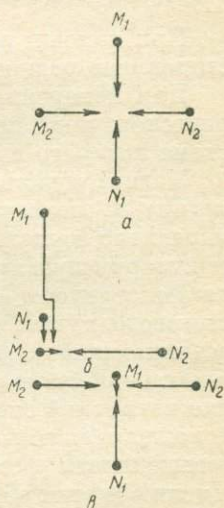


Рис. 182. Установки для регистрации магнитотеллурического поля.

a — крестообразная; b — Г-образная; δ — Т-образная.

Особенностью осциллографов ЭПО-6 и ЭПО-7М является то, что в них регистрирующая часть (гальванометры, оптическая система и лентопротяжный механизм) вынесена в отдельный корпус, а электроизмерительная часть (переключатели, реостаты критического режима, компенсаторы поляризации и градуировочное устройство) смонтирована в герметизированной приставке.

При работе в районах с хорошими условиями заземлений и при интенсивном поле теллурических токов входные линии подключают непосредственно к осциллографу.

Если условия заземлений тяжелые и поле теллурических токов слабое, используют двухканальный автокомпенсатор ЭДА-57, на выход которого переключают каналы ΔU осциллографа. Автокомпенсатор

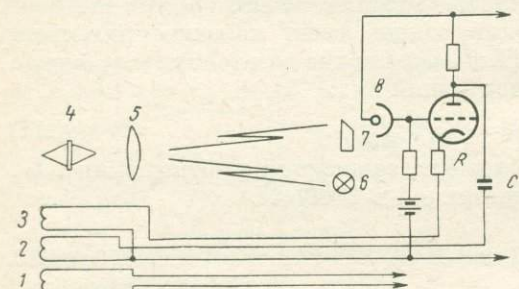


Рис. 183. Принципиальная схема магнитометра Брюнелли.

пенсатор в сочетании с осциллографом позволяет регистрировать поля с амплитудой до 50 мкВ. Обязательным в данном случае является критический режим работы гальванометров.

Телевключатель ТВ-6 обеспечивает синхронную запись марок времени на полевой и базисной точках, необходимую при работе методом ТТ.

При помощи радиостанции во время работы поддерживают двухстороннюю радиосвязь между операторами на обеих станциях.

Для измерения магнитной компоненты в методах магнитотеллурического поля применяют магнитометр Брюнелли, принципиальная схема которого изображена на рис. 183.

Магниточувствительным элементом магнитометра является магнит 4, подвешенный на упругой кварцевой нити. На магните укреплено зеркало, которое освещается лучом от осветителя 6 через фокусирующую линзу 5. Луч света, отраженный от зеркала, попадает на фотоэлемент 8. Светонепроницаемая заслонка 7 срезает часть светового пучка, направленного в сторону фотоэлемента. Фототок, возникающий в фотоэлементе, усиливается катодной лампой. Протекая по обмотке обратной связи 3, он вызывает добавочное отклонение магнитной системы. Вариации магнитного поля Земли изменяют положение магнитной системы и таким образом приводят к изменению освещенности фотоэлемента. В результате изменяется сила тока в цепи обмотки обратной связи. Полярность включения этой обмотки выбирается такой, чтобы ее магнитное поле компенсировало изменение магнитного поля Земли. Таким образом, вся система находится в состоянии автокомпенсации. Мерой интенсивности вариаций магнитного поля Земли является сила тока в компенсационной обмотке. Для регистрации этого тока последовательно с обмоткой включено

сопротивление *R*. Падение напряжения на этом сопротивлении регистрируется при помощи электроразведочного осциллографа.

Обмотка 2, включенная в анодную цепь лампы через емкость *C*, служит для успокоения подвесной системы магнитометра. Сила тока в этой обмотке, благодаря наличию емкости, пропорциональна угловой скорости движения магниточувствительной системы, а полярность подключения такова, что магнитное поле препятствует этому движению.

Обмотка 1 позволяет создать импульсы магнитного поля известной величины, используемые для градуировки магнитометра.

Длительность регистрации магнитотеллурического поля зависит от его интенсивности и чувствительности измерительных каналов, а также от характера изменения поля во времени. При магнитотеллурическом зондировании с аналоговой регистрацией иногда приходится производить непрерывную регистрацию *E* и *H* в течение нескольких дней для того, чтобы в процессе последующей обработки магнитотеллурических программ выбрать достаточное количество вариаций в необходимом для построения кривой МТЗ диапазоне частот. Это обстоятельство существенно ухудшает экономические характеристики методов магнитотеллурического поля.

В последнее время для регистрации магнитотеллурического поля применяют цифровые электроразведочные станции (см. гл. III).

Высокая чувствительность измерительных каналов в сочетании с большим динамическим диапазоном позволяет сократить необходимое время регистрации поля до десятков минут, а цифровая регистрация результатов измерения обеспечивает возможность непосредственного ввода результатов измерений в стандартные ЭВМ с целью их обработки и интерпретации.

Регистрацию поля теллурических токов целесообразно осуществлять при помощи электроразведочных осциллографов. Полевые работы этой модификацией магнитотеллурического профилирования обычно выполняют в масштабах 1 : 1 000 000—1 : 500 000 (региональные исследования) и 1 : 100 000—1 : 200 000 (поиски локальных нефтегазоносных структур). В первом случае расстояния между точками наблюдения колеблются от 5 до 15 км, во втором — от 1 до 4 км.

Расстояние между базисной и полевой точками не должно превышать в районах со сравнительно пологими структурами 60—80 км. В прибортовых частях впадин, т. е. там, где возможны сравнительно крутые углы падения пород, это расстояние не должно превышать 25—30 км.

Если площадь исследования велика и съемка ее не может быть выполнена с одной базисной точки, предварительно создают сеть базисных точек, поля на которых увязывают системой многократных наблюдений. Расстояние между базисными точками не должно превышать указанное выше расстояние между базисной и полевой точками.

Полевые операции на точках измерений начинают с подготовки приемных линий. Их взаимное расположение выбирают в соответствии с рис. 182. Наиболее удобной для производства полевых наблюдений является Г-образная установка. Заземление приемных линий осуществляют неполяризуемыми электродами.

После того как электроразведочные станции установлены у приемных линий и последние подключены к входным щиткам станции, операторы обеих станций устанавливают между собой радиосвязь и оператор полевой станции (оператор ПС) докладывает оператору базисной станции (оператор БС) о готовности аппаратуры к работе. Затем оператор БС, наблюдая за полем ТТ по шкале визуального наблюдения, дожидается появления вариаций с амплитудой не менее 15 мм. При появлении таких вариаций оператор БС подает команду о начале записи. По этой команде оба оператора включают моторы лентопротяжных механизмов, причем на базисной станции телевключатель устанавливают в положение передачи марок, а на полевой станции — в положение приема марок.

Перед началом записи операторы градуируют оба канала четырьмя градуировочными импульсами различной полярности с амплитудой не менее 30 мм и длительностью 8—10 с. В процессе записи операторы визуально следят за положением бликов и в случае необходимости компенсаторами поляризации корректируют их положение.

Чувствительность каналов в процессе записи может быть изменена, однако при этом обязательна повторная градуировка соответствующего канала. Длительность регистрации в среднем составляет 10—15 мин. Оператор БС должен следить за тем, чтобы запись поля была достаточно полной. Полной считается запись, на которой имеется не менее 10—20 вариаций поля с нелинейной поляризацией вектора E . Признак нелинейной поляризации — несинхронное изменение составляющих вектора E по направлениям приемных линий.

Определив момент конца записи, оператор БС при помощи телевключателя сигнализирует оператору ПС о прекращении регистрации. Затем оба оператора снова градуируют каналы ΔU и договариваются о порядке изменения стоянки полевой станции.

Полевые наблюдения регистрируют в журналах базисной и полевой станций. В этих журналах отмечают положение точки регистрации, азимуты приемных линий, время регистрации чувствительности каналов и величину градуировочных импульсов.

§ 6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Обработка магнитотеллурических диаграмм, зарегистрированных в процессе МТЗ, начинается с определения чувствительности измерительных каналов. Для определения этой величины используют градуировочные импульсы, записанные в обоих каналах перед началом и после регистрации поля.

Наиболее сложная и трудоемкая операция — выделение на магнитотеллу로그램мах квазисинусоидальных импульсов электрического и магнитного полей и определение их амплитуды и периода. Квазисинусоидальный импульс изображен на рис. 184; здесь же показан способ определения амплитуды и периода. Квазисинусоидальные импульсы объединяются в группы по периодам, которые в каждой группе не должны отличаться более чем на 10—15%.

По амплитудам магнитных и электрических составляющих поля для каждой группы определяют импеданс магнитотеллурического поля. Приемы расчета импеданса описаны в специальной литературе.

По рассчитанному значению импеданса в соответствии с выражением (X.6) вычисляют кажущееся сопротивление и затем строят

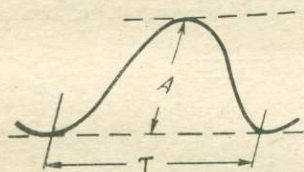


Рис. 184. Квазисинусоидальный импульс.

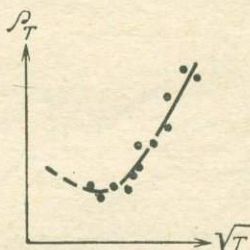


Рис. 185. Полевая кривая МТЗ.

кривую МТЗ. При построении этой кривой по оси ординат откладывают величину ρ_T , а по оси абсцисс — \sqrt{T} . Масштабы по обеим осям — логарифмические. Пример кривой МТЗ приведен на рис. 185.

Обработку теллуграмм начинают с синхронизации записей на базисной и полевой точках, для которой используют характерные марки, нанесенные телевключателем на ленту и внешне отличающиеся от рядовых. Кроме того, при оцифровке марок используют характерные особенности теллуграммы — всплески, связанные с грозowymi помехами, и др.

Следующая операция заключается в определении векторов вариации поля ТТ. Под вектором вариации понимают изменение поля ТТ в данной точке за некоторый период времени. Этот период времени выбирают одинаковым для базисной и полевой точек.

Способ определения составляющих вектора вариации показан на рис. 186.

Для двух выбранных моментов времени находят приращение компонент E_x и E_y в миллиметрах записи на осциллограмме.

Для пересчета измеренных приращений в милливольты их умножают на постоянную регистрирующую канала

$$p = \frac{\Delta U_{\text{гр}}}{l_{\text{MN}}} \cdot 100,$$

где $\Delta U_{гр}$ — градуировочное напряжение в мВ; l — усредненная для всех градуировок величина градуировочного импульса в мм; r_{MN} — длина приемной линии в км.

Геометрическая сумма составляющих E_x и E_y является вариацией поля ТТ на базисной точке. Аналогичным образом определяют вариацию поля на полевой точке.

Как указывалось выше, параметры магнитотеллурического поля в случае нелинейной поляризации последнего получают по усредненным значениям векторов E и H . Существует несколько приемов осреднения нелинейно поляризованного поля. Ниже описывается один из таких приемов, известный под названием **с п о с о б а э л л и п с о в**.

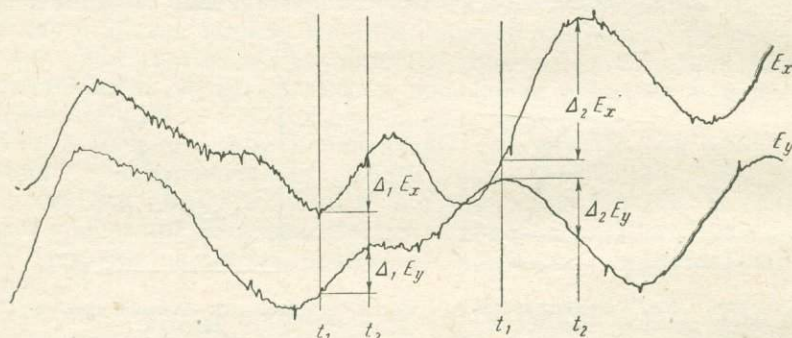


Рис. 186. Определение составляющих вектора вариации магнитотеллурического поля.

Для определения среднего значения напряженности поля способом эллипсов по данным осциллограмм магнитотеллурического поля базисной и полевой точек строят полярные диаграммы, включающие 10—12 синхронных векторов вариаций, равномерно заполняющих квадранты координатных систем, осями которых являются направления приемных линий (см. рис. 186).

Затем каждый из векторов диаграммы для базисной и полевой точек умножают на нормировочный множитель, равный единице, деленной на амплитуду соответствующего вектора. Очевидно, в этом случае нормированные векторы для базисной точки будут своими концами располагаться на окружности единичного радиуса. Можно доказать, что концы нормированных векторов вариаций для полевой точки опишут эллипс с полуосями A и B (рис. 187).

Отношение площади полевого эллипса к площади единичной окружности в базисной точке равно отношению средних значений поля в полевой и базисной точках. Это отношение принято называть **п а р а м е т р о м К**:

$$K = E_{ср. q} / E_{ср. p} = AB.$$

Карта изолиний параметра K — основной документ, по которому проводят геологическую интерпретацию результатов полевых наблюдений.

Эта карта иногда дополняется картой изолиний параметра M , где M — отношение малой и большой полуосей полевого эллипса:

$$M = B/A,$$

или картой средних значений напряженности поля на полевых точках:

$$E_{\text{ср. } q} = 100 E_{\text{ср. } p}.$$

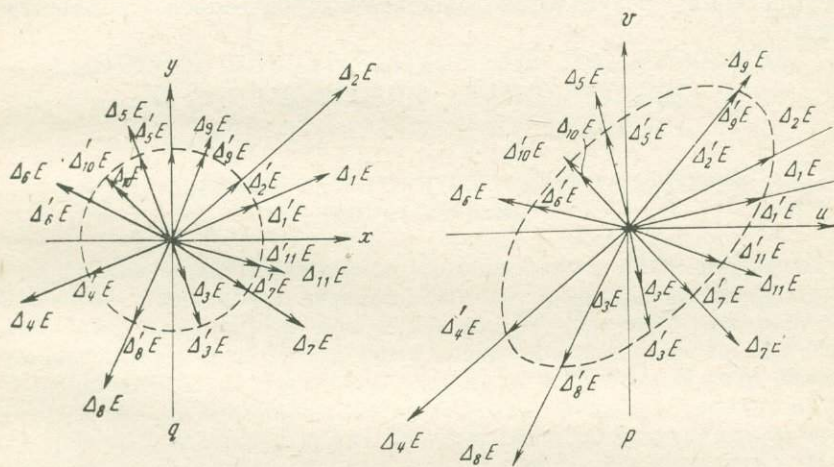


Рис. 187. Способ сопряженных эллипсов (без штрихов — наблюдаемые векторы вариаций, со штрихами — приведенные векторы вариаций).

В этой формуле среднее значение напряженности поля на базисной точке принято равным 100 условным единицам.

В соответствии с выражением (X.8) между продольной проводимостью надпорной толщи и величиной $E_{\text{ср. } q}$ имеется обратная зависимость — зонам с повышенным значением S соответствуют пониженные значения $E_{\text{ср. } q}$, и наоборот. Если учесть, что между S и мощностью надпорного горизонта H существует соотношение

$$S = H/\rho_i,$$

то над поднятиями высокоомного опорного горизонта на картах средней напряженности поля будут наблюдаться зоны максимальных значений $E_{\text{ср. } q}$.

Основная область применения методов магнитотеллурического поля — регионально-тектонические исследования, выполняемые с целью тектонического районирования больших площадей

и их подготовки к последующим более детальным структурным исследованиям главным образом сейсмическими методами. Среди задач подобного рода в первую очередь следует выделить картирование рельефа поверхности складчатого основания платформ.

Полевые исследования в зависимости от предполагаемых размеров основных структур обычно выполняют в масштабе от 1 : 1 000 000 до 1 : 100 000. Реже при поисках локальных структур масштаб укрупняют до 1 : 50 000.

Наиболее эффективно в геологическом отношении применение комплекса магнитотеллурических методов, включающего метод МТЗ и одну из модификаций магнитотеллурического профилирования. При этом данные, полученные МТЗ, используют как опорные при интерпретации результатов магнитотеллурического профилирования.

Глава XI

ЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И ЗОНДИРОВАНИЕ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

§ 1. СУЩНОСТЬ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Частотное электромагнитное зондирование (ЧЗ) представляет собой метод электроразведки переменным гармонически меняющимся полем, предназначенный для изучения геоэлектрических разрезов с горизонтальными либо пологими поверхностями разреза. Источником переменного электромагнитного поля в данном случае служит гармонически меняющийся электрический диполь — совокупность двух точечных заземлений A и B , питаемых переменным током через прямолинейный отрезок кабеля, соединяющий эти электроды. Поле изучают в точке, находящейся от источника на постоянном расстоянии, значительно большем, чем разнос AB . В процессе зондирования исследуют зависимость электрической и магнитной компонент поля диполя от частоты.

Как указывалось выше, 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 поля и точкой измерения при зондировании на постоянном токе. Кривые зависимости элементов поля электрического диполя от частоты характеризуют изменение геоэлектрического разреза с глубиной.

Расчет поля переменного электрического диполя, лежащего на поверхности слоистого разреза, основан на весьма сложных и громоздких теоретических выкладках, которые здесь не приводятся.

Схематически зависимость компонент поля от параметров среды и частоты поля может быть изображена в следующем виде:

$$E_x = E_{x0} F_1(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n; h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}; \omega; r), \quad (XI)$$

$$B_z = B_{z0} F_2(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n; h_1, h_2, h_3, \dots, h_{n-1}; \omega; r);$$

здесь E_x — компонента электрического поля, параллельная оси диполя; B_z — вертикальная компонента магнитного диполя; k_1, k_2, \dots, k_n — волновые числа пластов; h_1, h_2, \dots, h_{n-1} — мощности пластов; ω — частота поля; r — расстояние между диполем и точкой измерения поля; E_{x0} и B_{z0} — электрическое и магнитное поля диполя, момент которого изменяется с очень низкой частотой, а сам диполь находится на поверхности однородной среды, сопротивление которой равно сопротивлению ρ_1 верхнего слоя:

$$E_{x0} = I\rho_1 (3 \cos^2 \theta - 2) / 2\pi r^3, \\ B_{z0} = -3I\rho_1 \sin \theta / 2\pi r^4 i\omega. \quad (XI.2)$$

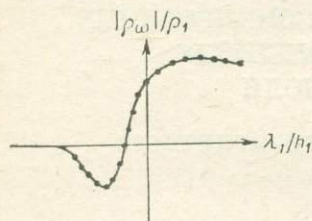


Рис. 188. Двухлобая кривая ρ_ω для электрической составляющей E_x .

$$r/h = 5,6; \quad \rho_2 = \infty.$$

Из этих выражений следует, что по измеренным на очень низких частотах компонентам нормального поля электрического диполя можно определить удельное сопротивление однородного полупространства:

$$\rho_1 = -B_{z0} 2\pi r^4 i\omega / 3I \sin \theta$$

или

$$\rho_1 = E_{x0} 2\pi r^3 / I (3 \cos^2 \theta - 2). \quad (XI.2')$$

Если B_z и E_x измеряются на поверхности неоднородной среды, то сопротивления, вычисленные по формулам (XI.2') будут иметь смысл кажущихся. В данном случае их принято обозначать ρ_ω :

$$\rho_\omega = -B_z 2\pi r^4 i\omega / 3I \sin \theta \quad (XI.3)$$

или

$$\rho_\omega = E_x 2\pi r^3 / I (3 \cos^2 \theta - 2).$$

Поскольку B_z и E_x меняются гармонически, кажущееся сопротивление, измеренное в поле переменного электрического диполя, характеризуется амплитудой и фазой, т. е.

$$\rho_\omega = |\rho_\omega| \cos(\omega t + \varphi_\omega).$$

При полевых измерениях и соответственно при расчете теоретических кривых может определяться либо амплитуда, либо фаза этого параметра.

Формулы для расчета ρ_ω при наличии горизонтально-слоистых разрезов можно получить, если в выражения (XI.3) подставить значения B_z и E_x , определяемые зависимостями (XI.4).

Следует иметь в виду, что эти формулы не удается получить в элементарном виде и для расчета палеток ρ_ω приходится поль-

зоваться электронно-вычислительными машинами. Лишь для некоторых простых разрезов, в частности для разрезов с подстилающим слоем бесконечно высокого сопротивления, разработаны упрощенные способы расчета палеток.

На рис. 188 в качестве примера изображена кривая ρ_{ω} , рассчитанная для двухслойного разреза с подстилающим горизонтом бесконечно высокого сопротивления. По оси абсцисс отложена длина волны в первом слое, отнесенная к мощности этого слоя, а по оси ординат — кажущееся удельное сопротивление, выраженное в долях сопротивления первого слоя.

§ 2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Комплект аппаратуры для частотного зондирования должен обеспечить питание электрического диполя переменным синусоидально меняющимся током и измерение амплитуды и фазы магнитной и электрической составляющих поля диполя в точке, отстоящей от него на постоянном расстоянии. Обычно частотное зондирование применяют для изучения рельефа опорных горизонтов, залегающих на глубине от нескольких сотен метров до нескольких километров и перекрытых мощной толщей неоднородных по сопротивлению пород. Диапазон частот, необходимый для изучения таких разрезов, снизу ограничен сотыми долями герца, а сверху — первыми сотнями герц. Расстояние между питающим диполем и точками измерения равно 10—20 км. При таких больших расстояниях для обеспечения достаточно высокого уровня сигнала в точке измерения сила тока в питающем диполе должна достигать 100—150 А.

Комплект аппаратуры для частотного зондирования состоит из двух основных узлов — генераторной группы и измерительной установки. Оба узла смонтированы на отдельных автомашинах повышенной проходимости.

Источником тока в генераторной группе служат два машинных генератора ПН-145 мощностью по 16,5 кВ·А каждый. При параллельном соединении оба генератора отдают в питающую линию ток 74 А при напряжении 450 В. Сопротивление питающей линии при этом не должно превышать 6 Ом.

Постоянное напряжение, развиваемое генераторами, коммутируется в импульсно-периодическое при помощи мощного тиратронного переключателя. Каждый последующий импульс имеет полярность, обратную по отношению к предыдущему. Таким образом, амплитуда импульсно-периодического тока, посылаемого в землю, удваивается по сравнению с амплитудой тока, снимаемого с генераторов.

Тиратронный ключ управляется задающим генератором, работающим на 24 фиксированных частотах в диапазоне от 0,04 до 250 Гц.

В качестве датчика магнитного поля в точке измерения используют квадратную рамку со сторонами 100—200 м, состоящую из 15—20 витков, которую раскладывают на земле.

Для измерения электрической составляющей поля применяют приемную линию длиной 500—1000 м, заземленную на концах непolarизующимися электродами.

Для усиления сигнала, поступающего с датчика, в комплекте измерительной установки служит усилитель, снабженный RC - и LC -фильтрами. Фильтры предназначены для отбора в измерительную цепь первой гармоники импульсно-периодического поля, создаваемого питающим диполем, а также для защиты измерительного устройства от различного рода помех (поля промышленных электроустановок, грозовые помехи и др.). Усиленное и отфильтрованное

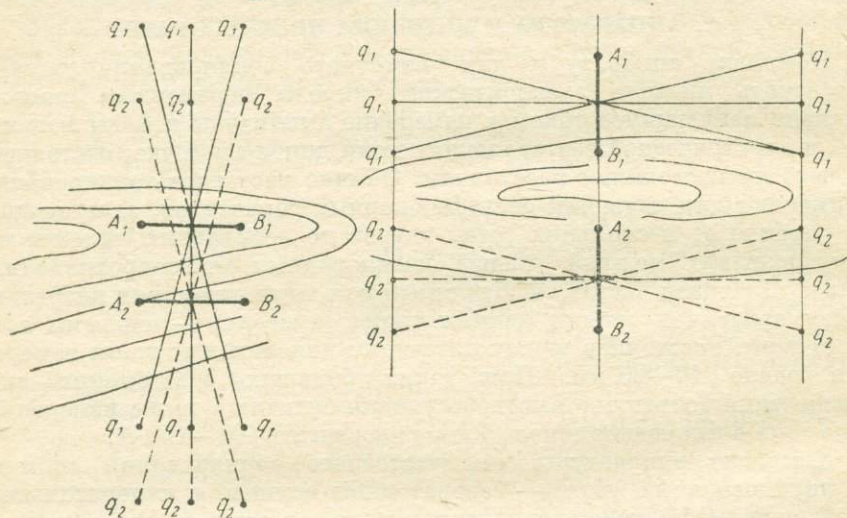


Рис. 189. Взаимное расположение питающего диполя и точек измерения при дипольно-экваториальном частотном зондировании.

AB — питающий диполь; **q** — точки измерений.

напряжение регистрируется при помощи шлейфового или катодного осциллографа. Специальное градуировочное устройство подает в измерительную линию градуировочные сигналы известной амплитуды.

Для измерения фазы электрического или магнитного поля с генераторной группы на измерительное устройство передается по радиоканалу опорная фаза.

Полевые работы обычно выполняют с дипольно-экваториальными установками (точка измерения расположена в экваториальной плоскости диполя), хотя не исключена возможность измерений с дипольно-осевыми установками.

Профили, вдоль которых ведут зондирование, располагают вкrest простираения изучаемых структур. Взаимное расположение питающего диполя и точек измерения вдоль профиля при работе с экваториальной установкой показано на рис. 189. При одном положении питающего диполя поле может измеряться в нескольких точках.

При этом для экваториальной установки угол, составленный радиусом-вектором, проведенным из центра питающего диполя в точку измерения, должен быть не менее 70° . В этом случае установка практически может считаться экваториальной.

Измеряют либо компоненту электрического поля, параллельную оси питающего диполя E_x , либо вертикальную компоненту магнитного поля B_z . Измерять E_x технически легче, чем B_z , особенно на нижних частотах рабочего диапазона. В связи с этим при отсутствии в изучаемом разрезе плохо проводящих пород, залегающих выше опорного горизонта (экранирующие пласты), ограничиваются измерениями E_x . При наличии в разрезе плохо проводящих экранов желательнее измерение B_z , так как плохо проводящий пласт не препятствует проникновению магнитного поля. Иногда измеряют обе компоненты поля. На каждой частоте на осциллограмме записывают измеряемое поле (э. д. с. в датчике) и градуировочную разность потенциалов в милливольтках. Это дает возможность оценить измеряемое поле также в милливольтках.

По результатам измерений определяют кажущееся сопротивление

$$|\rho_\omega| = K |\Delta U| / I,$$

а также

$$\varphi_\omega = \varphi_{\text{раб}} - \varphi_{\text{оп}};$$

здесь ΔU — э. д. с. в датчике электрического или магнитного поля; I — сила тока в питающем диполе; $\varphi_{\text{раб}}$ — фаза э. д. с. в датчике; $\varphi_{\text{оп}}$ — фаза опорного сигнала; K — коэффициент установки, рассчитываемый по следующим формулам:

$$K_{E_x} = 2\pi n^3 10^6 / r_{AB} r_{MN} (3 \cos^2 \theta - 2), \quad (\text{XI.4})$$

$$K_{B_z} = 2\pi n^4 10^6 / 3r_{AB} a n \sin \theta, \quad (\text{XI.5})$$

где n — число витков в петле; a — площадь петли в м^2 ; ΔU — напряжение в датчике в мкВ; I — сила тока в А.

По данным полевых наблюдений строят графики кажущегося сопротивления. При построении этих графиков по оси ординат откладывают $|\rho_\omega|$ или φ_ω , по оси абсцисс — \sqrt{T} .

Графики кажущегося сопротивления являются основным материалом, по которому интерпретируют результаты полевых наблюдений. Так же как и при зондированиях на постоянном токе, интерпретация часто может носить качественный характер и основываться на использовании таких особенностей кривых ЧЗ, как их тип, положение асимптот, глубина минимумов и др. Разработаны приемы количественной интерпретации, основанные на сравнении наблюдаемых в поле и теоретических кривых.

Частотные зондирования имеют ряд преимуществ перед зондированиями в постоянном поле. Наиболее существенным из этих преимуществ является уже отмеченная выше возможность изучения геоэлектрических разрезов, в состав которых входят экранирующие

пласты. Другое преимущество ЧЗ — возможность получения дополнительной информации о геоэлектрическом разрезе на основании фазовых кривых.

§ 3. МЕТОД ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Отличительной особенностью метода зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСП) является то, что он основан на изучении нестационарного электромагнитного поля, возбуждаемого электрическим диполем.

Предположим, что на поверхности земли расположен постоянный электрический диполь, состоящий из двух питающих электродов A и B и прямолинейного кабеля, через который эти электроды питаются постоянным током.

Проводящие горные породы, слагающие геоэлектрический разрез, оказываются в постоянном магнитном поле токов, текущих в кабеле и в земле. Если в некоторый момент времени выключить ток в цепи электродов A и B , то первичное магнитное поле ступенчато изменится от некоторого конечного значения до нуля. Вследствие этого изменения в проводящих горных породах будут индуцироваться вторичные токи, распределение которых таково, что они в первый момент будут стремиться сохранить неизменным первичное поле внутри проводящих областей разреза. В последующие моменты времени вторичные токи перераспределяются в пространстве и затухают вследствие тепловых потерь.

Переходный процесс в электромагнитном поле электрического диполя изучают при помощи измерительных электрического и магнитного диполей, расположенных от питающего на расстояниях, значительно больших длины питающего диполя.

Поскольку в начальные моменты времени после выключения тока в питающем диполе вторичные токи распределяются в приповерхностной части разреза и лишь в процессе развития переходного процесса проникают в глубь его, характер зависимости электрического и магнитного полей от времени на ранних стадиях развития 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 геоэлектрического разреза в вертикальном направлении. Здесь мы наблюдаем аналогию ЗСП с частотным зондированием, причем изучение частотных зависимостей (частотных характеристик) в поле гармонически меняющегося диполя при ЧЗ замещается изучением временных зависимостей (переходных характеристик) в поле ступенчато изменяющегося электрического диполя. Эта аналогия, физически объясненная выше, имеет математическую основу. Известно, что переходная и частотная характеристики линейных электрических систем однозначно связаны между собой.

Разработаны методы пересчета частотных характеристик в переходные и наоборот. Соответственно, принципиально возможен пересчет кривой частотного зондирования в кривую зондирования становлением поля. Все сказанное свидетельствует о том, что методы ЧЗ и ЗСП обладают близкими возможностями и должны применяться для решения сходных геологических задач. Вместе с тем метод ЗСП отличается некоторыми техническими особенностями, облегчающими выполнение полевых исследований.

При зондировании становлением поля электромагнитное поле питающего диполя исследуют после того, как в этом диполе выключен ток. Таким образом, аномальные эффекты от токов, текущих в земле, измеряют при отсутствии первичного поля. Это весьма облегчает процесс зондирования, поскольку снижаются требования к точности измерительной аппаратуры.

Существенным преимуществом метода ЗСП является то, что полевые работы этим методом могут выполняться серийной аппаратурой, применяемой для зондирований на постоянном токе, после введения в нее небольших изменений.

Комплект аппаратуры для работы методом ЗСП должен обеспечить возможность возбуждения первичного постоянного поля, ступенчатое изменение его в различные моменты времени, а также регистрацию переходного процесса в течение нескольких десятков секунд, следующих за переключением тока в питающем устройстве.

Аппаратура состоит из двух основных узлов — генераторной группы и полевой лаборатории. В качестве генераторной группы используется соответствующая часть электроразведочной станции ЭРС-23 либо ЭРСУ-60 (универсальная электроразведочная станция, выпущенная в 1960 году).

Диполь, служащий источником первичного поля, изготовляют из провода ГПСМ. Для уменьшения сопротивления заземления *A* и *B* выполняют из большого числа (50—100 штук) штыревых электродов длиной около 1 м. Суммарное сопротивление обоих заземлений не должно превышать 8—10 Ом.

В качестве датчиков электрического и магнитного полей применяют электрический диполь и индукционную рамку. Устройство и параметры этих датчиков практически не отличаются от описанных выше для частотного зондирования.

Сигнал, получаемый на выходе датчиков, поступает на усилители постоянного напряжения и затем на шлейфовый осциллограф ЭПО-6 или ЭПО-7, где записывается при скорости протяжки фотобумаги 0,5—1,5 см/с.

При измерении электрической составляющей поля сигнал в приемной линии обычно бывает настолько интенсивным, что применение усилителя оказывается необязательным.

Для нанесения на осциллограмму марок времени, синхронизированных с моментом прерывания тока в питающем диполе, используют радиоканал. На генераторной группе и в полевой лаборатории установлены приемо-передающие радиостанции РПМС с радиусом

действия, равным нескольким десяткам километров. Эти радиостанции обеспечивают дистанционное управление каналом маркировки времени в лаборатории и двухстороннюю радиосвязь между операторами в генераторной группе и в лаборатории. Аппаратура смонтирована в автомашине повышенной проходимости и выпускается промышленностью под маркой ЭУЛ-60 (электроразведочная универсальная лаборатория).

В связи с тем, что нестационарное электрическое и магнитное поля обладают непрерывным спектром, измерительные каналы должны обладать широкой полосой пропускания для того, чтобы зарегистрировать неискаженный сигнал. Это обстоятельство обуславливает слабую помехозащищенность аппаратуры для регистрации нестационарных полей. Выделение полезного сигнала на фоне помех должно проводиться в процессе обработки полевых материалов путем применения статистических приемов. Эта трудоемкая вычислительная операция наиболее эффективно может быть выполнена при помощи ЭВМ. Последнее обстоятельство обуславливает целесообразность применения в качестве аппаратуры, регистрирующей нестационарные электромагнитные поля, цифровой электроразведочной станции (ЦЭС) в сочетании с устройством ввода полевой информации в ЭВМ общего типа. Применение ЦЭС позволяет существенно повысить эффективность полевых работ методом ЗСП.

Зондирование становлением поля выполняется при неизменном расстоянии между питающим и измерительными диполями. Это расстояние зависит от требуемой глубины исследования.

В зависимости от расстояния между источником и точкой измерения различают зондирование становлением поля в дальней и ближней зонах.

При зондировании в дальней зоне разнос установки должен в несколько раз превышать глубину залегания опорного горизонта. При зондировании в ближней зоне разнос близок к глубине залегания опорного горизонта.

Размер питающего диполя не должен превышать половины разноса (чтобы практически сохранилась дипольность установки). Так же как и при частотном зондировании, наиболее употребительны двухсторонние экваториальные установки (см. рис. 189). Измеряют обычно компоненту электрического поля E_x , параллельную оси диполя, и вертикальную компоненту магнитного поля B_z .

Если в надпорной толще пород нет высокоомных экранирующих горизонтов, можно ограничиться измерением E_x . При наличии экранов необходимо измерять B_z . Электрическая компонента поля в большей степени зависит от рельефа экранирующих пород.

Программа записи осциллограммы при зондировании становлением поля включает в себя 15—20 рабочих и последующих разнополярных градуировочных импульсов, необходимых для определения цены 1 мм записи в милливольтках. Длительность импульсов берут достаточной для того, чтобы переходные процессы к концу каждого

импульса практически закончились. Обычно для этого достаточно 100—200 с.

Образец осциллограммы, записанной по указанной выше программе, приведен на рис. 190.

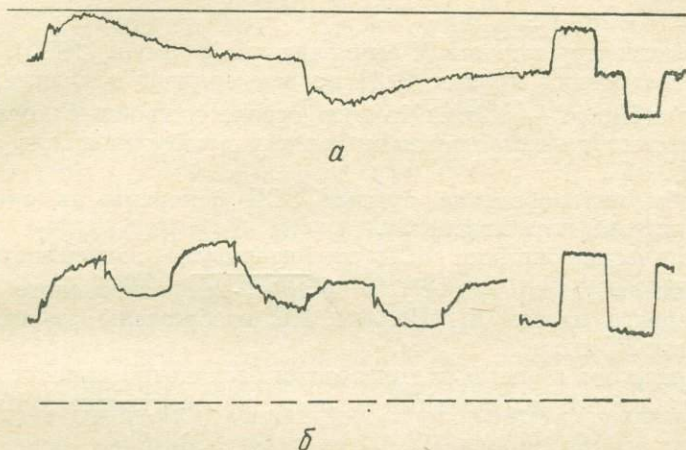


Рис. 190. Типичные осциллограммы, полученные при работе методом ЗСП. Становление поля: а — магнитного, б — электрического.

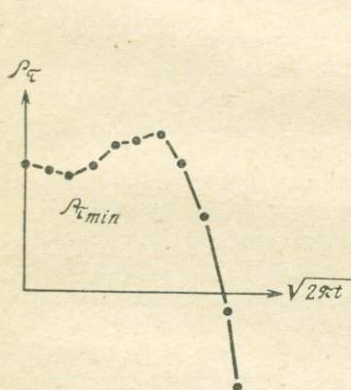


Рис. 191. Полевая кривая ЗСП.

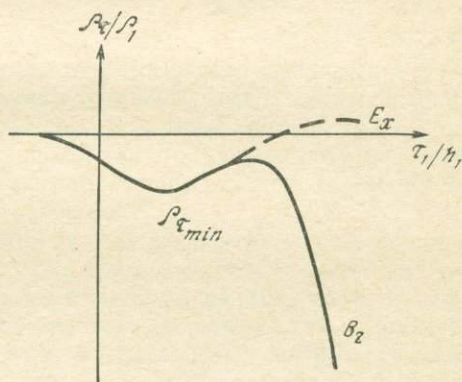


Рис. 192. Теоретические кривые ЗПС, полученные с экваториальной установкой.

Обработка осциллограммы заключается в определении разности потенциалов на выходе датчиков поля для различных моментов времени $\Delta U(t)$. Величина $\Delta U(t)$ для этих моментов получается как произведение отклонения блика соответствующего канала осциллографа в миллиметрах на цену 1 мм в микровольтах, определенную по градуировочным импульсам.

Значение $\Delta U(t)$ определяется по всем пригодным для обработки импульсам и затем осредняется. По значениям $\Delta U(t)$ подсчитывают величину кажущегося сопротивления ρ_τ :

$$\rho_\tau = K \Delta U(t) / I,$$

где ΔU — в мкВ; I — в А.

Коэффициент установки K вычисляют по формуле (XI.5).

При построении кривых ЗСП по оси ординат откладывают ρ_τ , а по оси абсцисс — $\sqrt{2\pi}t$. Кривую строят в двойном логарифмическом масштабе на стандартных бланках с модулем шкалы 6,25 см (рис. 191).

Способы интерпретации кривых ЗСП основаны на сравнении полевых кривых с палеточными.

Теоретические кривые ЗСП характеризуют зависимость ρ_τ / ρ_1 от безразмерного параметра $\tau_1 = \sqrt{10^7 \rho_1} \cdot 2\pi t$, отнесенного к мощности первого пласта h_1 . На рис. 192 изображены теоретические кривые для E_x и B_z .

Для разрезов с опорным горизонтом бесконечно высокого сопротивления созданы упрощенные приемы, не требующие применения палеток.

Глава XII

ИНДУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДАХ

К индуктивным относятся такие методы электроразведки, в которых электромагнитное поле создается при помощи незаземленных контуров, обтекаемых переменным током. В качестве таких контуров могут служить рамки малых размеров, большие прямоугольные петли, очень длинные кабели и др. Электромагнитное поле этих источников (обычно его магнитная компонента) исследуется на дневной поверхности, в скважинах или над поверхностью земли (наземные, скважинные и аэроэлектроразведочные варианты индуктивных методов).

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.

Рис. 193 иллюстрирует сущность тех явлений, которые определяют характер переменных электромагнитных полей, наблюдаемых в индуктивных методах электроразведки.

Первичное переменное поле источника индуцирует в проводящем геоэлектрическом разрезе вихревые токи, интенсивность которых определяется характером геоэлектрического разреза, типом и расположением источника, а также зависимостью поля от времени. Схематично можно выделить токи, наведенные в покровных отложениях, в рудовмещающих породах и в локальных рудных залежах. Магнитные поля вихревых токов накладываются на первичное поле незаземленного контура и являются одним из источников наблюдаемых аномалий. При рудопоисковых исследованиях особый интерес представляют те аномалии, которые связаны с вихревыми токами в рудных залежах. При геологическом картировании большую роль играют аномалии от вихревых токов во вмещающих покровных отложениях.

В том случае, когда вихревые токи, наведенные в проводящем разрезе, пересекают поверхности раздела сред с различным удельным

сопротивлением, на этих поверхностях накапливаются электрические заряды, поле которых обуславливает перераспределение токов в окружающей среде. В частности, токи в окрестностях хорошо проводящих рудных тел концентрируются в этих телах подобно тому, как это происходит в постоянных полях (см. гл. III), токи в окрестностях плохо проводящих тел обтекают последние и т. д. Аномалии, связанные с подобным перераспределением токов, принято называть **концентрационными**.

Если горные породы и руды, слагающие геоэлектрический разрез, обладают повышенной магнитной восприимчивостью, то, намагни-

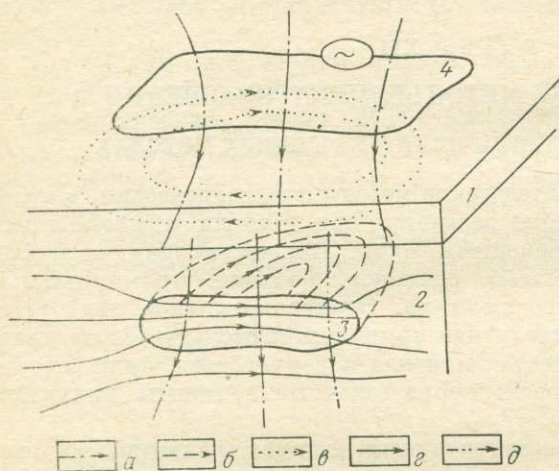


Рис. 193. Проводящий магнитный разрез в переменном индуктивно-возбужденном поле.

1 — покровные отложения; 2 — рудовмещающие породы; 3 — проводящая магнитная рудная залежь; 4 — источник первичного поля; силовые линии: а — первичного поля, б — вихревых токов в рудном теле; в — вихревых токов в покровных отложениях; г — вихревых токов в рудовмещающих породах; д — индуцированных магнитных зарядов.

чиваясь в первичном магнитном поле, они создают аномалии, которые мы в дальнейшем будем называть **магнитостатическими**.

Аномалии вихревого, концентрационного и магнитостатического типов сложным образом накладываются друг на друга, создавая суммарное аномальное поле. Специальным выбором типа источника поля, его зависимости от времени и измеряемого параметра поля можно усилить одни аномальные эффекты, подавить другие и таким образом специализировать модификации индуктивных методов для решения тех или иных геологических задач.

Теория индуктивных методов электроразведки строится на основе расчетов и моделирования электромагнитных полей при наличии проводящих геоэлектрических разрезов. Вследствие математических затруднений расчеты удается выполнить лишь для простейших разрезов. В более сложных случаях приходится прибегать к моделированию.

Для теории рудопоисковых модификаций индуктивных методов большую роль играют расчеты переменных электромагнитных полей при наличии локальных проводящих тел, для картировочных модификаций — расчеты полей в присутствии однородного или горизонтально-слоистого разреза.

Пусть в первично-однородном магнитном поле H_0 , меняющемся с частотой ω , находится проводящее тело сферической формы, обладающее проводимостью γ и радиусом a (рис. 194). Проводимость вмещающей среды будем полагать равной нулю. Изменение магнитного потока через любой контур внутри проводящей сферы приводит к появлению э. д. с. в этом контуре и соответственно к току, сила которого прямо пропорциональна э. д. с. в контуре и обратно пропорциональна его сопротивлению.

Вихревые токи в сфере циркулируют по окружностям, расположенным в плоскостях, перпендикулярных к направлению первичного поля и имеющих центры на оси симметрии, совпадающей с направлением первичного поля.

Величина суммарного поля, наблюдаемого в точке с координатами r и θ , может быть вычислена по следующей формуле, которая здесь приводится без вывода:

$$\begin{aligned} H_r &= H_{x0} (1 - D/\eta^3) \cos \theta, \\ H_\theta &= -H_{x0} (1 + D/2\eta^3) \sin \theta; \end{aligned} \quad (\text{XII.1})$$

здесь H_{x0} — первичное магнитное поле; r и θ — сферические координаты точки, для которой рассчитывается поле; $\eta = r/a$ — расстояние от точки наблюдения до центра сферы, выраженное в радиусах сферы; D — коэффициент, зависящий от частоты поля, проводимости, магнитной проницаемости сферы и ее радиуса.

Из приведенных выражений следует, что аномальные компоненты поля при наличии сферы

$$\begin{aligned} H_{ra} &= H_r - H_{x0} \cos \theta = H_{x0} \frac{D}{\eta^3} \cos \theta, \\ H_{\theta a} &= H_\theta + H_{x0} \sin \theta = H_{x0} \frac{D}{2\eta^3} \sin \theta \end{aligned}$$

совпадают с полем магнитного диполя, помещенного в центр сферы и имеющего момент, прямо пропорциональный первичному полю и зависящий от коэффициента D . Физический смысл этого коэффициента можно выяснить, если принять $\theta = 0$ и $r = a$, т. е. расположить точку наблюдения на поверхности сферы. В этом случае

$$H_\theta = 0, \quad H_{ra}/H_{x0} = D,$$

т. е. функция D равна аномальному полю на поверхности сферы.

График зависимости этой функции от безразмерного параметра $ra^2 = \gamma \omega \mu a^2$ изображен на рис. 195. На графике приведена также зависимость фазы суммарного поля от того же параметра.

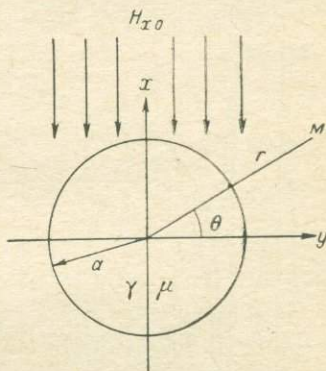


Рис. 194. Проводящая сфера в первично-однородном переменном магнитном поле.

При постоянных величинах сферы и ее проводимости графики на рис. 195 характеризуют зависимость аномального поля и фазы суммарного поля от его частоты. При достаточно низких частотах (в области $pa^2 < 3$) амплитуда аномального поля и фаза суммарного поля растут приблизительно пропорционально частоте. Это объясняется тем, что э. д. с., наведенная в любом контуре внутри сферы, растет пропорционально частоте, а скин-эффект внутри проводящего тела при столь низких частотах еще не сказывается. С повышением частоты рост амплитуды аномального поля замедляется

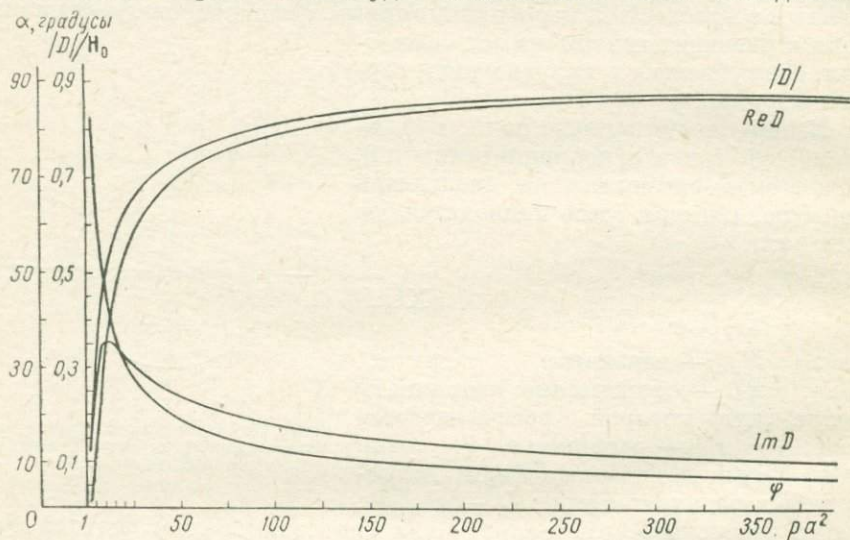


Рис. 195. Графики функции D .

и в области достаточно высоких частот (при $pa^2 > 120$) она практически остается постоянной и равной амплитуде первичного поля ($D = 1$) на поверхности сферы. Эта весьма характерная особенность в частотной зависимости аномалии объясняется тем, что с ростом частоты скин-эффект приводит к выжиманию вихревых токов к поверхности сферы, т. е. к уменьшению сечения проводника и таким образом к увеличению его сопротивления. В результате рост э. д. с. с частотой компенсируется увеличением сопротивления и плотность вихревых токов, а следовательно, и аномальное поле перестают зависеть от частоты.

Фаза суммарного поля достигает максимума в области $pa^2 \approx 10$ и затем по мере роста частоты уменьшается. Это объясняется тем, что в области достаточно высоких частот индуктивное сопротивление сферы значительно больше ее активного сопротивления.

Расчет и моделирование переменных электромагнитных полей для тел более сложной формы (цилиндра, пласта и др.) свидетельствуют о том, что частотная зависимость аномалии от этих тел имеет общий характер, подобный описанному выше для сферы. Оказалось,

что частотные характеристики аномалий от проводящих тел различной формы, построенные в полулогарифмическом масштабе, приблизительно совпадают, если по оси абсцисс откладывать параметр ρQ^2 , где Q — некоторый характерный размер, равный для сферы радиусу, деленному на $\sqrt{2}$, для цилиндра — радиусу, а для пласта — произведению мощности на длину по падению.

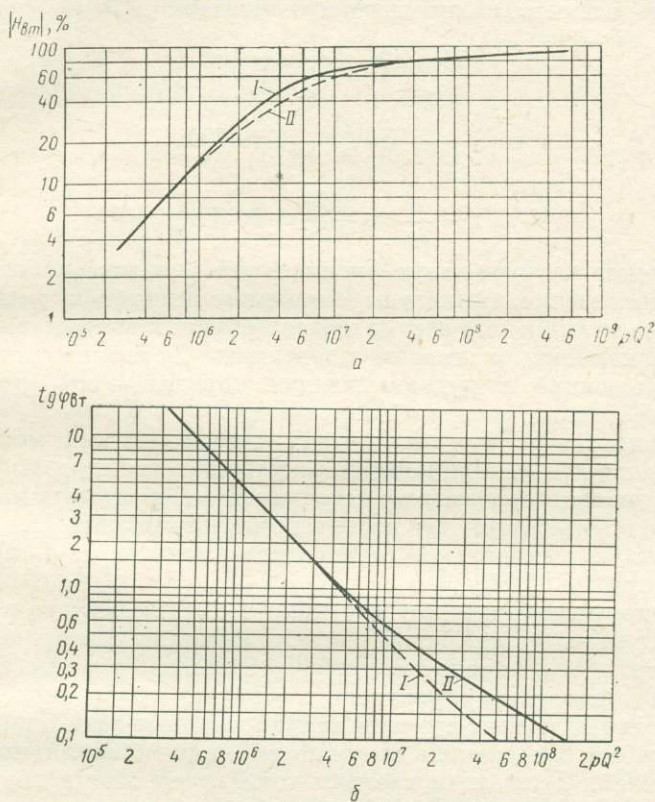


Рис. 196. Обобщенная параметрическая характеристика.
 a — амплитуда вторичного поля для тел: I — с изометрическим сечением, II — вытянутых по падению; b — тангенс фазы вторичного поля $\text{tg } \varphi_{\delta T}$: I — для пластины, II — для цилиндра, шара.

График зависимости амплитуды и фазы аномального поля от параметра ρQ^2 получил название обобщенной параметрической характеристики аномалии (рис. 196).

Описанные выше особенности в частотных характеристиках аномалий позволяют выбрать оптимальную частоту при работе индуктивными методами электроразведки. Очевидно, что при поисках хорошо проводящих рудных тел частота должна быть такой, чтобы амплитудные и фазовые аномалии от этих тел были максимальны, а аномалии от неоднородностей во вмещающей сфере (зон дробления,

покровных отложений и др.) — минимальны. Исходя из первого требования, рабочую частоту желательно выбирать такой, чтобы параметр pQ^2 приблизительно равнялся 10—12. Так, например, если на исследуемой площади рудные залежи имеют изомерную форму, близкую к сфере с радиусом $a = 100$ м, а удельное сопротивление руды равно $0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, то оптимальную рабочую частоту можно определить из следующего соотношения:

$$pQ^2 \approx 12; \quad \frac{1}{4} \gamma_{\text{ом}} a^2 \approx 12,$$

т. е.

$$\omega \approx \frac{4 \cdot 12}{10 \cdot 100^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \approx 400;$$

отсюда

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \approx \frac{400}{6,28} \approx 60 \text{ Гц.}$$

Повышение частоты сверх оптимальной практически не обуславливает увеличение амплитуды аномалии, а ведет к уменьшению фазовых аномалий и, что весьма нежелательно, к возрастанию интенсивности аномалий от хорошо проводящих покровных отложений и неоднородностей в рудовмещающих породах — зон дробления, графитизированных разностей пород и др.

Ниже показано, что обобщенная характеристика может быть использована при интерпретации результатов полевых наблюдений для определения параметров источников наблюдаемых аномалий.

Предположим теперь, что первичное магнитное поле H_{x_0} в момент времени $t = 0$ меняется по ступенчатому закону, т. е. при $t \geq 0$ $H_{x_0} > 0$, при $t \leq 0$ $H_{x_0} = 0$.

В соответствии с законом индукции в момент резкого изменения первичного поля в проводящей среде индуцируются вторичные токи, интенсивность и распределение которых таково, что они стремятся сохранить неизменным первичное поле внутри проводника.

В начальный момент времени индуцированные токи циркулируют на поверхности сферы вдоль окружностей, перпендикулярных к оси x и соосных ей. С течением времени токи проникают в глубь сферы и одновременно затухают вследствие расхода энергии на выделение тепла.

Математически описанный выше переходный процесс в сферическом проводнике может быть описан следующими выражениями:

$$H_{er}(t) = H_{x_0} \frac{a^3}{r^3} \cos \theta L_c(at), \quad (\text{XII.2})$$

$$H_{e\theta}(t) = \frac{1}{2} H_{x_0} \frac{a^3}{r^3} \sin \theta L_c(at),$$

где

$$L_c(at) = 6 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-\alpha(\pi k)^2 t}}{(\pi k)^2}; \quad (\text{XII.3})$$

$$\alpha = 1/\gamma_{\text{ом}} a^2. \quad (\text{XII.4})$$

Таким образом, и в данном случае поле вихревых токов, наведенных в проводящей сфере, совпадает с полем диполя, помещенного в центре сферы с осью, направленной против первичного поля. Момент этого диполя убывает со временем по закону бесконечной суммы экспонент, входящей в выражение для переходной функции L_c . Скорость убывания характеризуется параметром α , имеющим размерность, обратную времени. Из выражения (XII.4) следует, что в хорошо проводящих телах вихревые токи затухают медленнее, чем в плохо проводящих.

График зависимости L_c от t изображен на рис. 197.

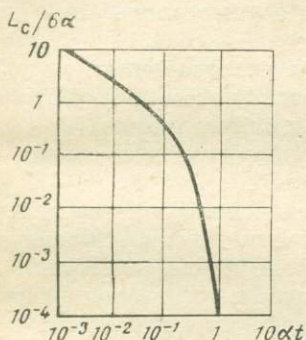


Рис. 197. График зависимости L_c от t .

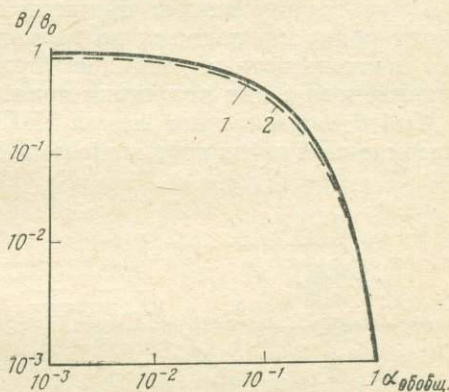


Рис. 198. Обобщенная переходная характеристика.

1 — для цилиндра; 2 — для сферы.

Расчеты, выполненные для тел цилиндрической и сферической формы, а также моделирование — для тел более сложной формы, свидетельствуют о сходстве зависимостей нестационарного поля от времени для локальных проводящих тел различной формы. Таким образом, оказалось возможным построить обобщенную переходную характеристику, описывающую нестационарное поле для тел различной формы, так, как это было сделано выше для гармонически меняющихся полей.

Обобщенная переходная характеристика (рис. 198) представляет собой зависимость переходной функции L от некоторого обобщенного параметра

$$\alpha_{\text{обобщ}} = 1/\gamma\mu Q,$$

где Q — квадрат характерного размера тела, аналогичного введенному выше размеру локального проводника для частотных характеристик.

Отметим, что для рудных залежей, сложенных хорошо проводящими массивными рудами, параметр $\alpha_{\text{обобщ}}$ в зависимости от размера залежи и ее проводимости колеблется от первых единиц до нескольких десятков с^{-1} .

Выбор времени регистрации переходного процесса, оптимального для хорошо проводящих руд, определяется соотношением между неустановившимся сигналом от искоемых рудных залежей и сигналом от вихревых токов, наводимых в момент ступенчатого изменения первичного поля во вмещающих и покровных отложениях. Расчеты, подтвержденные опытом полевых работ, свидетельствуют о том, что при поисках хорошо проводящих руд неустановившийся сигнал следует регистрировать в интервале от одной-двух до 20—30 мс.

§ 2. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ

В эту группу входят индуктивные методы, в которых применяются поля, меняющиеся по гармоническому закону. Классификацию низкочастотных методов принято осуществлять по типу применяемого в них источника поля.

Метод незаземленной петли (НП). При исследованиях методом незаземленной петли первичное поле создается витком провода в виде

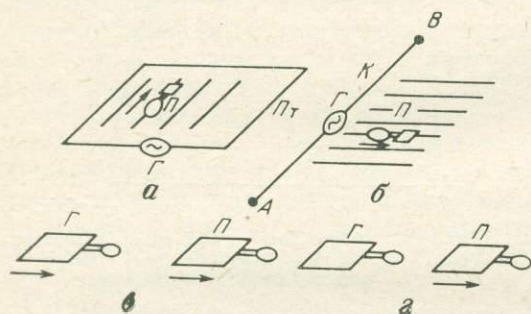


Рис. 199. Основные модификации индуктивных методов.

а — метод незаземленной петли; б — метод бесконечно длинного кабеля; в — дипольно-индуктивное профилирование; г — дипольно-индуктивное зондирование; Г — генератор; П — приемник; К — кабель; Пт — петля.

не исключена возможность измерения

прямоугольника со сторонами от нескольких сотен метров до 1—2 км, расположенным на поверхности земли. Магнитное поле петли измеряют на профилях, расположенных либо внутри петли, в ее центральной части, либо на профилях, расположенных вне петли перпендикулярно к ее длинной стороне (рис. 199, а). Обычно измеряют амплитуду и фазу или только амплитуду вертикальной составляющей поля, хотя горизонтальной составляющей.

Метод бесконечно длинного кабеля (БДК). В этом методе источником поля служит длинный прямолинейный кабель, заземленный на концах (рис. 199, б). Магнитное поле кабеля изучают вдоль профилей, ориентированных перпендикулярно к кабелю или параллельно ему. Длину профилей и их расстояние от кабеля выбирают таким образом, чтобы во всех точках наблюдения магнитное поле токов, введенных в землю через питающие электроды, было пренебрежимо мало по сравнению с магнитным полем токов, текущих в кабеле. Таким образом, несмотря на наличие заземлений в питающей линии, метод бесконечно длинного кабеля по существу индуктивный.

При работе методом БДК, так же как и при работе методом незаземленной петли, измеряют амплитуду и фазу или только ампли-

туду вертикальной и реже горизонтальной составляющей магнитного поля. В обоих методах применяют сходную генераторную и измерительную аппаратуру.

Дипольное индуктивное профилирование (ДИП). Эта модификация индуктивных методов характеризуется тем, что источником первичного поля служит магнитный диполь — многовитковая рамка небольшого диаметра (около 1 м), обтекаемая переменным током. Магнитное поле, так же как и в других индуктивных методах, измеряют при помощи приемной рамки (измерительного диполя). Оба диполя в процессе полевых работ перемещают вдоль профиля без изменения взаимного положения (рис. 199, в).

Дипольное индуктивное зондирование (ДИЗ). Отличается от профилирования тем, что изучается зависимость поля неподвижного магнитного диполя от расстояния между ним и измерительным диполем (дистанционное зондирование) или зависимость поля от частоты при неподвижных генераторном и измерительном диполях (частотное зондирование).

Способы измерения магнитного поля. При полевых работах индуктивными методами применяются абсолютные и относительные способы измерения магнитного поля.

Абсолютные измерения. При абсолютных измерениях определяют амплитуду и фазу, либо только амплитуду или фазу различных пространственных составляющих магнитного поля в точке измерения. К абсолютным следует отнести измерение элементов эллипса поляризации вектора магнитного поля.

Для абсолютных измерений наиболее широко применяют амплитудный вольтметр. На рис. 200 приведена блок-схема вольтметра ИМА (измеритель магнитной амплитуды), собранного на унифицированных блоках электроразведочной аппаратуры, изготавливаемых заводами геофизического приборостроения.

В качестве датчика *1* в вольтметре ИМА применена секционированная катушка с ферритовым сердечником; при помощи надлежащей коммутации секций и подстроечных конденсаторов датчик может быть настроен на одну из четырех частот — 78, 312, 1250 и 2500 Гц. Датчик устанавливается на штативе и при помощи двухосного угломерного устройства может быть ориентирован по любому выбранному заранее направлению, компоненту поля вдоль которого желательно измерить. Сигнал с датчика поступает на выносной усилитель *2*, снабженный калиброванным делителем напряжения. Усилитель укреплен на штативе датчика. С выхода выносного усилителя сигнал по соединительному шлангу поступает на семиступенчатый делитель напряжений *3*, а затем на усилитель *4*, снабженный активным фильтром *5*, настроенным на рабочие частоты. Фильтр позволяет

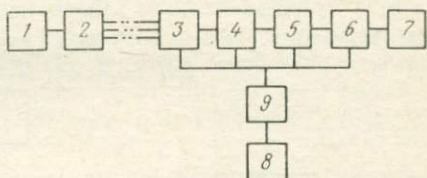


Рис. 200. Блок-схема микровольтметра ИМА.

подавлять внешние помехи и внутренние шумы схемы. Амплитудный детектор 6 выпрямляет усиленный и отфильтрованный сигнал. Микроамперметр 7 предназначен для измерения этого сигнала, а также для контроля напряжения питания, которое осуществляется батареей 8 через стабилизатор напряжения 9.

В том случае, когда необходимо использовать поля, меняющиеся с частотой менее 78 Гц, для абсолютных измерений амплитуды магнитного поля может быть применен комплект аппаратуры ИКС-50, в котором измерительный прибор укомплектован магнитоиндукционным датчиком.

Относительные измерения. При относительных измерениях определяют отношение амплитуд и разность фаз магнитного поля в двух точках исследуемой площади или в одной и той же точке,



Рис. 201. Блок-схема афиметра АФИ-4.

но для двух пространственных составляющих. Для относительных измерений применяют а ф и м е т р ы (амплитудно-фазовые измерители). Блок-схема афиметра АФИ-4 изображена на рис. 201.

Датчиками магнитного поля в афиметре служат две многовитковые рамки с ферритовыми сердечниками.

Измеряемые напряжения с датчиков поля 1 поступают на выносные усилители 2, расположенные около рамок или измерительных электродов, и затем на градуированные в децибеллах делители напряжения 3, при помощи которых амплитуда измеряемых сигналов делится без изменения их фазы. С делителей напряжения сигналы поступают на градуированные в градусах фазовращатели 4, которые изменяют фазы этих сигналов без изменения их амплитуды. Поступающие с выхода фазовращателей сигналы смешиваются на сумматоре 5 и затем подаются на вход индикатора нуля, представляющего собой высокочувствительный избирательный усилитель 6 со стрелочным прибором 7 на выходе.

Процесс измерения с афиметром заключается в том, что при помощи делителей напряжения уравнивают амплитуды сигналов в обеих рамках; используя фазовращатели 4, сдвиг по фазе этих сигналов доводят до 180° . Поскольку на сумматор поступают два равных по амплитуде и противоположных по фазе сигнала, индикатор нуля отмечает момент уравнивания нулевым показанием стрелочного прибора (или отсутствием звука в телефоне). Отсчет

по шкалам делителя напряжений равен отношению амплитуд поля в двух точках, а отсчет по шкалам фазовращателей — сдвигу фаз.

Полевые работы. Полевые работы низкочастотными индуктивными методами включают обычно два этапа — поисковую съемку и детализационные работы. Этим этапам предшествуют опытные работы на хорошо изученных в геологическом отношении площадях или на участках с разведанными рудными телами. В процессе опытных работ выбирают оптимальные для данных условий размеры петли, рабочую частоту, а также ориентировку и расположение профилей.

Поисковую съемку выполняют обычно в масштабе от 1 : 5000 до 1 : 25 000. В районах с простым геоэлектрическим разрезом (маломощные покровные отложения, высокоомные и однородные рудовмещающие породы) общую съемку можно проводить на одной частоте, подобранной таким образом, чтобы рудные залежи, характерные для данного района, наиболее четко отмечались аномальными эффектами. При поисках колчеданных и иных залежей хорошо проводящих руд эту частоту берут равной 200—400 Гц. При поисках залежей крупного размера рабочую частоту можно снизить до десятков герц.

В районах с мощными и хорошо проводящими покровными отложениями и неоднородными рудовмещающими породами поисковую съемку с амплитудными вольтметрами рекомендуется выполнять на двух частотах. Это позволяет уже в процессе общей съемки составить представление о природе источников обнаруживаемых аномалий. Обычно одну частоту выбирают близкой к оптимальной, а вторую — в 2—3 раза выше.

Поисковую съемку с афиметрами обычно проводят на одной частоте. Природа аномалии в этом случае определяется по соотношению амплитудных и фазовых аномалий.

В том случае, когда объектом исследования являются высокомагнитные геологические объекты (например, залежи магнитных железных руд), одну из рабочих частот целесообразно выбирать настолько низкой, чтобы аномалии магнитостатического характера существенно превышали аномалии от вихревых токов, наведенных в проводящих областях разреза. Вторую рабочую частоту в этом случае можно выбирать достаточно высокой для того, чтобы по результатам наблюдений судить о проводимости горных пород и руд, слагающих геоэлектрический разрез исследуемой площади.

Детальные съемки выполняют на аномальных зонах, обнаруженных в процессе общих съемок, а также в пределах аномальных зон, выделенных другими геофизическими методами.

В задачу этих съемок входит уточнение контуров аномальных зон и, что самое существенное, определение геологической природы аномалий.

Для уменьшения влияния токов, наведенных во вмещающих породах, детализационные исследования следует выполнять на планшетах, расположенных в центральной части незаземленной

петли, т. е. там, где нормальное электрическое поле минимально (см. гл. IX).

Характерной особенностью детализационных работ является то, что съемка магнитного поля выполняется на нескольких частотах. Количество частот и их диапазон выбирают такими, чтобы можно было построить частотные характеристики аномалий. В соответствии с возможностями серийной аппаратуры частоту изменяют от десятков до первых тысяч герц. Количество фиксированных частот в этом диапазоне колеблется от 6 до 8.

Полевые работы индуктивными методами начинают с топографической подготовки участка съемки, в задачу которой входит разметка на местности сторон петель или линий размотки прямолинейного кабеля, а также разбивка профилей. При поисках залежей среднего и крупного размеров используют петли с длиной сторон от нескольких сотен метров до 2—3 км. Следует иметь в виду, что применение петель больших размеров выгодно в экономическом отношении, так как при этом уменьшаются затраты времени на смоточно-размоточные работы; кроме того, внутри петель больших размеров уместаются длинные профили, необходимые для изучения широких аномальных зон, характерных для глубинных объектов. Использование петель малых размеров (со сторонами до 100—200 м) оказывается необходимым при работе в районах с мощными покровными либо хорошо проводящими рудовмещающими породами, так как с уменьшением размеров петель понижается влияние этих пород. При работе методом БДК длина кабеля колеблется от одного до нескольких километров.

Расположение профилей, вдоль которых наблюдается магнитное поле, в значительной мере определяет характер получаемых результатов.

В центральной части незаземленной петли электрические компоненты нормального поля от токов, текущих через противоположные стороны петли, компенсируют друг друга (вследствие того, что эти токи направлены противоположно). Таким образом, аномалии, наблюдаемые в центральной части петли, связаны главным образом с вихревыми токами в хорошо проводящих частях геоэлектрического разреза. Это значительно облегчает интерпретацию аномалий, т. е. определение параметров (размеров и проводимости) их источников.

Аномалии, отмечаемые на профилях, внешних по отношению к петле, имеют двоякую природу: они могут быть связаны как с вихревыми токами, так и с токами, концентрирующимися в хорошо проводящих областях разреза. Это обстоятельство затрудняет интерпретацию результатов наблюдений.

Длину профилей обычно берут такой, чтобы она была равна половине длины петли, параллельной профилям. При работе с бесконечно длинным кабелем профили обычно располагают перпендикулярно к кабелю на участке средней трети последнего. Длина их не должна превышать $\frac{1}{3}$ длины кабеля.

Вслед за топографическими работами электроразведочные бригады начинают раскладку проводов-петель по сторонам размеченных прямоугольников-планшетов или по линиям размотки кабеля (для метода БДК). Концы кабеля заземляют посредством железных стержневых электродов.

Полевые измерения методами незаземленной петли или БДК с амплитудным вольтметром.

При абсолютных измерениях с амплитудным вольтметром измерительный комплект обслуживается бригадой из трех человек: оператора, вычислителя и рабочего. Наблюдения в поле петли или кабеля могут выполняться двумя-тремя работающими независимо друг от друга измерительными комплектами одновременно.

Перед началом измерений магнитного поля проверяют при помощи тестера сохранность петли, отсутствие в ней разрывов. При наличии разрывов последние ликвидируют; затем оператор на генераторной группе после предварительного прогрева генератора включает ток в петлю, устанавливает нужную частоту и силу тока, после чего подает сигнал для начала измерений на профилях. При измерениях с амплитудным вольтметром перед началом работы проверяют напряжение источников питания и в случае необходимости заменяют израсходованные батареи.

На исходной точке профиля рабочий устанавливает по уровню измерительную рамку горизонтально или вертикально (в зависимости от измеряемой компоненты поля). В это время оператор проверяет и в случае необходимости корректирует коэффициент усиления вольтметра, подключает рамку к входу прибора, выбирает предел измерения так, чтобы отсчет составлял не менее $1/3$ шкалы, и затем производит отсчет.

Вычислитель записывает отсчет в полевой журнал и наносит результаты измерения на график. Если нанесенная точка не нарушает плавного характера кривой, прибор перемещают на следующую точку профиля. При переходе с точки на точку измерительную рамку оставляют подключенной к прибору, питание которого не выключают. В том случае, когда новая точка графика нарушает плавный ход кривой, необходимо повторить измерения на данной и предыдущей точках профиля. Лишь убедившись в сходимости результатов измерений в пределах $\pm 2\%$, оператор может продолжать перемещение по профилю. Повторные измерения на двух точках профиля необходимо также выполнять при перерывах в работе по условиям погоды, по техническим причинам или вследствие окончания рабочего дня.

Для увязки наблюдений, выполненных на различных профилях в различное время и различными приборами, проводят двукратный промер поля вдоль магистрали, которую обычно прокладывают по центральным или начальным точкам всех профилей. Промер поля по магистрали поручается наиболее опытному оператору. Измерения выполняют без перерыва в работе генераторной группы и измерительного прибора.

Первичная обработка результатов наблюдений заключается в приведении измеренных значений амплитуд магнитного поля к постоянной силе тока в петле и к относительным единицам, общим для всех используемых вольтметров. Первая задача решается путем деления измеренных величин поля на силу тока в петле.

Для увязки наблюдений, выполненных на различных профилях различными приборами, отсчеты на всех точках каждого профиля умножают на поправочный коэффициент, равный частному от деления отсчета на увязочной точке каждого профиля на отсчет в этой же точке, полученной при рядовой съемке.

Полевые измерения методами незаземленной петли или БДК с афиметрами.

При относительных амплитудно-фазовых измерениях с афиметрами измерительный комплект обслуживается бригадой из пяти человек — оператора, вычислителя и трех рабочих.

Полевые измерения с комплектом АФИ начинают с подготовки измерительного прибора. Эта подготовка заключается в проверке и в случае необходимости в смене источников питания, в проверке сохранности соединительных шлангов, при помощи которых рамки подключаются к прибору.

Перед началом измерений на каждом профиле и на его среднем пикете проверяют идентичность измерительных каналов афиметра. Для этого обе рамки располагают на расстоянии 1 м друг от друга горизонтально и на ручках фазовращателя и делителя напряжений устанавливают нулевые отсчеты; затем при помощи корректора отношений амплитуд и фазовращателя добиваются нулевого отсчета индикатора нуля. Если затем переключателем входа прибора изменить порядок подключения рамок к входу прибора на обратный, при идентичных измерительных каналах на индикаторе нуля должен сохраниться нулевой отсчет. При неидентичных каналах стрелка индикатора нуля сместится с нулевого положения. В этом случае фазовращателем и делителем напряжений снова добиваются нулевого отсчета индикатора. Половина отсчета по делителю напряжений и фазовращателю является поправкой на неидентичность измерительных каналов.

Измерения на каждой точке профиля выполняют следующим образом. После того как рабочие установили рамки на двух последовательно расположенных точках профиля, оператор подает команду «внимание». По этой команде рабочие устанавливают рамки по уровню, а оператор проводит грубую компенсацию сигналов. Затем по команде «отсчет» рабочие уточняют по уровню положение рамок, а оператор осуществляет точную компенсацию сигналов и диктует вычислителю отсчеты разности фаз в градусах и отношения амплитуд в децибеллах, дает сведения о положении переключателя входов и разности отсчетов по шкале компенсатора, при которых рабочая частота начинает прослушиваться на фоне шумов или помех. Эта величина характеризует точность измерений.

Записав отсчеты в журнал, нанеся результаты наблюдений на

график и убедившись в плавном ходе кривой, вычислитель подает команду «вперед». По этой команде заднюю по ходу профиля рамку переносят на место передней, а переднюю — перемещают вперед на расстояние, равное шагу установки. Питание прибора при этом не выключают.

Первичная обработка результатов измерений заключается в введении поправки на неидентичность каналов афиметра. Величину этой поправки, как указано выше, определяют для каждого профиля.

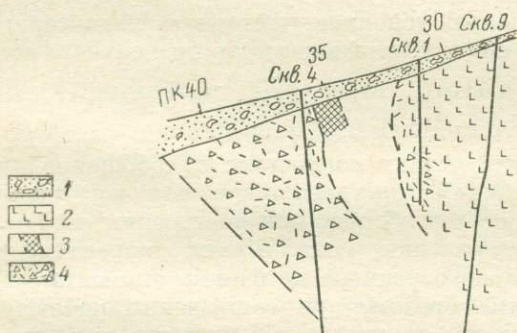


Рис. 202. Графики амплитуды вертикальной составляющей магнитного поля петли (геологический разрез составлен по результатам геофизических и буровых работ).

1 — четвертичные отложения; 2 — слиты; 3 — положение массивных руд по геофизическим данным; 4 — кварцево-серцитовые породы с вкрапленными рудами.

Контроль за точностью полевых наблюдений осуществляют путем повторной съемки по выборочным профилям, равномерно распределенным по съемочной площади, а также во времени. Количество повторных измерений составляет 10% общего объема работ. Допустимая погрешность при работе с ИМА 2%, при работе с афиметрами 1,5% по отношению амплитуд и 15' по сдвигу фаз.

Изображение и интерпретация результатов наблюдений. Результаты съемки поля петли или кабеля изображают в виде графиков амплитуд, отношения амплитуд или сдвигов фаз, карт графиков этих величин и иногда в виде карт изолиний амплитуд поля.

График амплитуд вертикальной составляющей поля петли изображен на рис. 202.

На картах графиков следует показывать положение петли и закрепленных точек. Карты желательно строить на геологической основе

и показывать на них результаты работ другими геофизическими методами.

Карты изолиний амплитуд строят для небольших участков, изученных детальной съемкой и расположенных в центральной части петли, т. е. там, где нормальное поле однородно.

Результаты многочастотных измерений изображают в виде графиков, карт графиков и карт изолиний поля для различных частот. Аномальные значения поля снимают с графиков и по ним строят частотные характеристики аномалий.

Геологическая интерпретация материалов, полученных в процессе общей съемки, проводится с целью выделения участков с аномальным поведением поля; она позволяет также дать предварительную геологическую оценку аномалий. Эта оценка дается по характеру графиков аномального поля, интенсивности аномалий и их геологическому положению.

Интерпретация частотных характеристик аномалий — основной прием определения геологической природы аномалий. Известно несколько приемов интерпретации частотных характеристик. Ниже описан способ, основанный на применении обобщенной параметрической характеристики амплитуды аномального поля.

Наблюдаемую в полевых условиях частотную характеристику амплитуды аномального поля, т. е. зависимость процентного соотношения $\frac{H_a}{H_0} \cdot 100\%$ от частоты, строят на прозрачном двойном логарифмическом бланке с модулем 6,25 см.

Эту частотную характеристику совмещают с обобщенной параметрической характеристикой, построенной в том же масштабе. Как указывалось выше, по оси абсцисс при построении обобщенной параметрической характеристики откладывают параметр $\gamma Q \omega$, где Q — квадрат характерного размера источника аномалий, а γ — его проводимость. Таким образом, при совмещении наблюдаемой и обобщенной характеристик смещение логарифмических шкал по оси абсцисс равно произведению γQ . Для того чтобы от этого произведения перейти к размерам источника аномалии, необходимо знать его удельное сопротивление и задаться геологически обоснованной гипотезой о форме рудного тела. Так, например, если для рудных тел в данном районе характерна изомерная форма, то можно принять $Q = \frac{1}{2} a^2$, где a — радиус сферы, близкой по размеру к рудному телу. Значения Q для пласта и цилиндра были приведены в § 1 этой главы.

Следует иметь в виду, что описанный выше прием, а также другие приемы определения параметров источников аномалий дают количественные результаты, позволяющие оценивать лишь порядок интересующих нас размеров или проводимости источников аномалии, а не их точное значение. Весьма существенно то, что, зная порядок произведения γQ , можно уверенно судить о том, связана ли аномалия с хорошо проводящей рудой или ее источник — неоднородность вмещающих или покровных отложений.

Полевые работы методом ДИП. Полевые работы методом дипольного индуктивного профилирования могут выполняться несколькими установками, различающимися взаимным расположением генераторного и измерительного диполей (рис. 203). Наиболее часто применяются установки с вертикальным генераторным и вертикальным же измерительным диполями (установка ZZ) или с вертикальным генераторным и горизонтальным, совпадающим с направлением профиля, измерительным диполями (установка ZY), а также установки, в которых измеряется угол α наклона к горизонту большой оси эллипса поляризации магнитного поля в вертикальной плоскости, совпадающей с профилем наблюдения (установка $Z\alpha$). Не исключена возможность применения установок с горизонтальным генераторным диполем.

В процессе профилирования генераторный и приемный диполи устанавливают на соответствующих точках предварительно разбитого на местности профиля. Генераторный диполь устанавливают так, чтобы плоскость его витков была горизонтальна, а измерительный — в зависимости от типа установки: горизонтально (ZZ) или вертикально и перпендикулярно к профилю (ZY).

В этом положении включают питание генератора и измерителя и после достаточного прогрева аппаратуры берут отсчет по стрелочному прибору вольтметра. В дальнейшем при переходе с точки на точку питание аппаратуры не выключают.

Для измерения угла α горизонтальную ось вращения измерительной рамки устанавливают перпендикулярно к профилю и рамку вращают вокруг этой оси до тех пор, пока стрелочный прибор вольтметра не покажет минимальный отсчет. Это соответствует такому положению рамки, при котором плоскость ее витков совпадает с большой осью эллипса поляризации. В этом положении по угломерному устройству рамки берут отсчет угла наклона α .

По измеренным величинам H_z , H_y или α определяют кажущееся сопротивление — параметр, близкий по смыслу к параметру, используемому в методе сопротивлений.

Как указывалось в гл. IX, компоненты нормального поля магнитного диполя однозначно определяются параметром $p = 2,81 r \sqrt{f/\rho}$ (предполагается, что токи смещения малы по сравнению с токами проводимости). Отсюда следует, что, измерив какую-либо из этих компонент, можно определить параметр p , а затем, зная частоту f , — найти удельное сопротивление среды, заполняющей однородное полупространство.

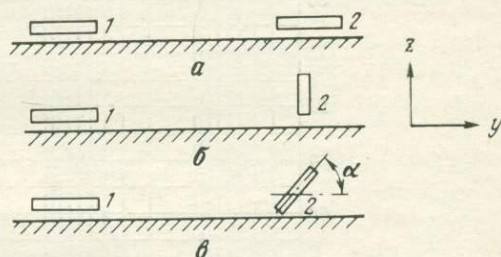


Рис. 203. Установки для дипольного индуктивного профилирования.

Установки: а — ZZ, б — ZY, в — $Z\alpha$; диполи: 1 — генераторные, 2 — измерительные.

В том случае, когда измерения проводятся над неоднородным в электрическом отношении разрезом, параметр p и соответственно сопротивление, определенное по расчетным формулам или графикам, являются фиктивными величинами, лишь по размерности совпадающими с p или ρ . Эти параметры целесообразно назвать кажущимися. Отметим, что кажущееся сопротивление, рассчитанное по наблюдаемым компонентам поля диполя, в случае однородного разреза совпадает с истинным. Величина кажущегося удельного сопротивления зависит от строения геоэлектрического разреза,

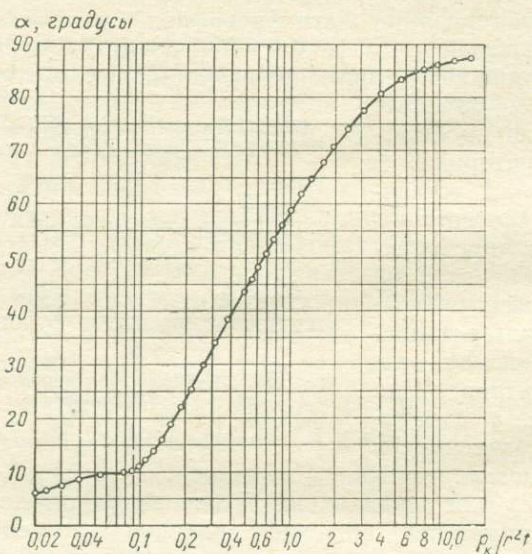


Рис. 204. Номограмма для определения ρ_k по измеренным значениям α .

расстояния и взаимной ориентировки записей, а также от частоты поля. Поскольку изучение геоэлектрического разреза — основная задача исследования, методика полевых работ должна быть такой, чтобы зависимость ρ_k от характера разреза проявлялась наиболее четко. С другой стороны, эта методика должна быть проста и производительна. Установки, изображенные на рис. 203, удовлетворяют этим требованиям.

Рассчитаны номограммы, позволяющие определять ρ_k по измеренному значению H_z , H_y , α и по известным величинам r (в км) и f (в Гц).

На рис. 204 приведена одна из этих номограмм, предназначенная для определения ρ_k по величине угла α . Для этого по измеренной величине α находят точку с соответствующей ординатой на кривой номограммы. Затем определяют абсциссу этой точки и, умножая ее на $r^2 f$, получают искомое значение ρ_k . При этом частота f должна

быть выражена в Гц, а расстояние r (между генератором и приемником) в км.

Результаты наблюдений изображают в виде графиков или карт графиков ρ_k . Способы построения и тех и других аналогичны описанным в гл. V.

§ 3. МЕТОД ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Сущность метода переходных процессов (МПП) заключается в изучении нестационарного электромагнитного поля, создаваемого при помощи незаземленных контуров, ток в которых ступенчато изменяется от некоторого постоянного значения до нуля. Переходный процесс в ступенчато изменяющемся магнитном поле изучают на поверхности земли, в скважинах или над землей.

В качестве источника первичного поля при работе методом переходных процессов, так же как и в гармонических полях, используют большие незаземленные петли или рамки малых размеров — диполи.

От рассмотренных выше низкочастотных методов МПП выгодно отличается тем, что вторичное магнитное поле токов, наведенных в земле, изучается после исчезновения первичного поля. Это обстоятельство способствует существенному увеличению информативности измеряемого сигнала, так как первичное поле источника по существу не несет какой-либо информации о геоэлектрическом разрезе. Отсутствие в момент измерения первичного поля обуславливает снижение требований к точности измерений. Вместе с тем повышаются требования к чувствительности измерительного устройства и мощности генераторной группы. В связи с тем, что скорость затухания токов, наведенных в различных частях геоэлектрического разреза (покровных отложениях, рудных залежах), зависит от их удельного сопротивления и размеров, в благоприятных условиях, измеряя разные стадии переходного процесса, можно разделить во времени влияние на измеряемое поле различных геологических объектов, например рудных тел и рудовмещающих пород.

Так как нестационарное поле содержит в своем спектре принципиально неограниченный диапазон частот, измерение этого поля должно осуществляться аппаратурой с широкой полосой пропускания сигнала.

Известно, что такая аппаратура обладает весьма слабой помехозащищенностью. Для улучшения помехозащищенности аппаратуры, предназначенной для измерения нестационарного поля, приходится принимать специальные меры. Это является недостатком МПП.

В настоящее время наземные работы МПП выполняют рамочно-петлевой установкой и установкой с совмещенными петлями.

В рамочно-петлевой установке (рис. 205, а) источником первичного поля служит большая незаземленная прямоугольная петля со сторонами от нескольких сотен метров до 1—2 км, раскладываемая на дневной поверхности. Нестационарное поле

измеряют при помощи измерительной рамки, перемещающейся вдоль профилей, расположенных в центральной части петли. Эту модификацию метода переходных процессов в дальнейшем будем сокращенно обозначать МППР.

В установке со совмещенными генераторной и измерительной петлями (однопетлевая установка) источником поля служит незаземленная петля со сторонами от нескольких десятков до первых сотен метров (рис. 205, б). В качестве датчика нестационарного поля используют ту же петлю, переключаемую в нужный момент с выхода генераторной группы на вход измерительного прибора, либо отдельную петлю, пространственно совмещенную с генераторной. Эту модификацию метода переходных процессов в дальнейшем будем сокращенно обозначать МППО.

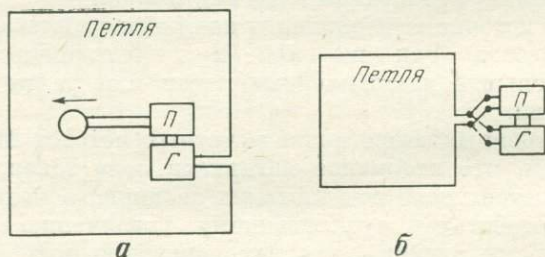


Рис. 205. Установки для работы методом переходных процессов.

а — рамочно-петлевая; б — с совмещенной генераторной и измерительной петлями; П — приемник; Г — генератор.

В электроразведочных установках, использующих стационарные поля, пространственное объединение источника и датчика поля обычно приводит к резкому снижению глубинности исследования за счет интенсивного влияния первичного поля (или нескомпенсированной его части), а также влияния той части геоэлектрического разреза, которая непосредственно примыкает к установке. В описываемой модификации МПП первичное поле отсутствует, а вторичное поле, связанное с вихревыми токами в прилегающей к петле части разреза, быстро затухает вследствие малых размеров этой области.

Существенным преимуществом МППО является то, что в результате одного измерения поля получается информация о геоэлектрическом разрезе в пределах площади, околупетленной петлей. Это определяет высокую производительность полевых работ.

Наряду с этим МППО уступает МППР в детальности полевых исследований. Отмеченные особенности определяют область и последовательность применения обеих модификаций МПП в процессе полевых электроразведочных исследований.

Аппаратура. В методе переходных процессов применяются два различных способа измерения нестационарного поля, иллюстрируемые временными диаграммами на рис. 206.

Первый способ (рис. 206, *a, б*) заключается в осциллографической регистрации нестационарной э. д. с., наведенной в измерительной рамке после единичного выключения тока в генераторной рамке. Преимущество этого способа — возможность получения полной характеристики нестационарного поля за все время регистрации, недостаток — уже отмеченная выше слабая помехозащищенность измерительного тракта.

Второй способ характерен тем, что первичное поле возбуждается при помощи периодически следующих друг за другом прямоугольных импульсов тока в генераторной рамке (рис. 206, *в*). Переходный

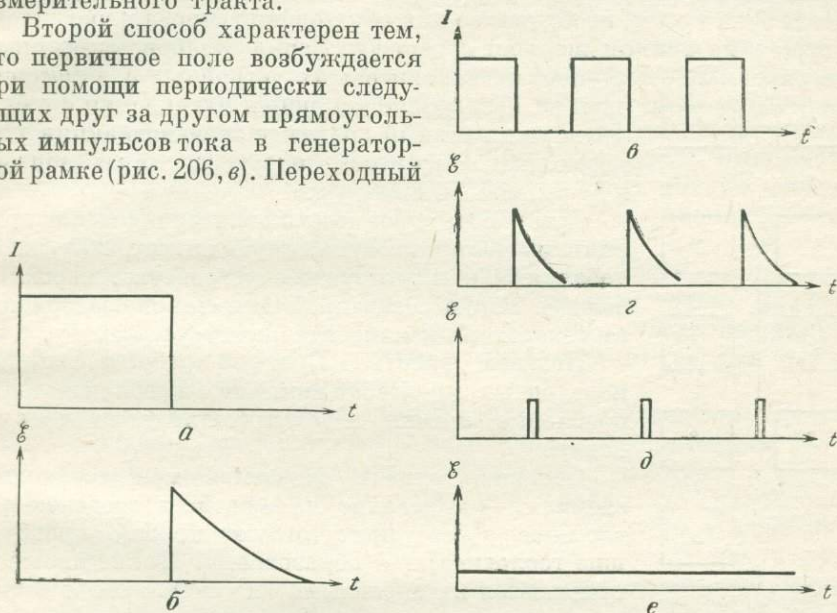


Рис. 206. Способы измерения нестационарного поля.

a, б — при единичном выключении тока в петле; *в—e* — в периодически-импульсном режиме.

процесс исследуется в паузах между импульсами тока (рис. 206, *в*). Для этого при помощи специального коммутирующего устройства в заданный момент времени после выключения тока из нестационарного сигнала вырезается кратковременный импульс-строб (рис. 206, *д*). Амплитуда строба равна среднему значению нестационарного сигнала за время стробирования. Последовательность стробов подается на накопительное устройство, и затем осредненное значение сигнала за время стробирования подается на выходной измерительный стрелочный прибор (рис. 206, *е*). Существенное преимущество такого способа измерения нестационарного поля — его высокая помехозащищенность, обусловленная тем, что помехи, имеющие частоту, отличающуюся от частоты следования импульсов первичного поля, попадают на накопитель в различных фазах и при осреднении их уровень резко снижается.

На рис. 207 изображена блок-схема аппаратуры, использующей описанный выше способ измерения нестационарного поля. Генератор *1* создает в петле *2* последовательность однополярных

или разнополярных импульсов тока прямоугольной формы с периодом следования $2T$ и скважностью около 2. Наиболее крутые начальные части заднего фронта импульсов магнитного поля петли создают в измерительной рамке 3 сигнал, который после усиления вспомогательным усилителем 4 запускает устройство задержки 5. Это устройство с заданной задержкой времени относительно момента выключения тока в петле 6 формирует управляющий импульс, отпирающий усилитель 7 на время, необходимое для образования строба переходного процесса на данном времени задержки. Серия стробов, следующая с периодом $2T$, поступает на накопительное устройство 8. Осредненный на накопителе за время накопления сигнал, пропорциональный среднему значению амплитуды переходного процесса, поступает на стрелочный измерительный прибор 9.

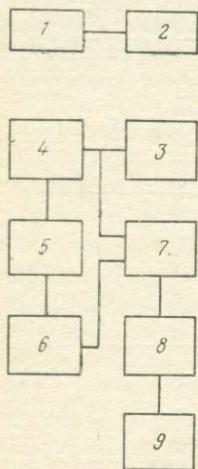


Рис. 207. Блок-схема аппаратуры для измерения поля в периодически-импульсном режиме.

Для работы с совмещенным источником и приемником поля в изображенную на рис. 207 схему добавляют коммутирующее устройство, переключающее петлю с заданной временной задержкой от генератора к измерительному устройству.

Полевые работы. Полевые работы методом переходных процессов включают в себя два этапа: поисковые съемки и детализационные исследования.

Основная задача, решаемая при поисковых съемках, — выделение площадей, в пределах которых в разрезе присутствуют хорошо проводящие геологические образования. Такие площади отмечаются интенсивными и аномально затянутыми переходными процессами.

На этапе детализационных съемок изучают геологическую природу аномалий, выделенных на предыдущем этапе, и уточняют размеры и положение источников аномалий. Поисковые съемки рекомендуется выполнять, пользуясь методикой МППО. Эта рекомендация вытекает из уже отмеченного выше экономического фактора — быстроты съемки.

Обычно при поисках рудных месторождений поисковые съемки выполняют при помощи квадратных петель с длиной стороны, равной 2—3-кратной предполагаемой глубине залегания рудных тел. Практически эта длина колеблется от нескольких десятков до первых сотен метров.

Исследуемую площадь покрывают системой петель сплошную, так что один и тот же отрезок провода участвует в образовании двух соседних петель. Петли изготавливают из электроразведочного провода, обладающего достаточно низким сопротивлением, например ГПСМПО.

При каждом положении питающей петли измеряют амплитуду переходного процесса на одном или нескольких временах задержки, допускаемых аппаратурой.

Детальные съемки выполняют в пределах аномальных зон, обнаруженных в процессе общих съемок МПП или другими геофизическими методами. Эти съемки рекомендуется проводить с автономной измерительной рамкой (МППР). Петлю с размером сторон около 1 км следует раскладывать так, чтобы изучаемая аномальная зона оказывалась в ее центральной части. Обычно масштаб съемки 1 : 5000—1 : 10 000, хотя не исключена возможность съемки и в более крупном масштабе. Измеряют вертикальную или вертикальную и горизонтальную составляющие поля. Выбор времени, на котором измеряется сигнал, определяется двумя противоречивыми требованиями: оно должно быть по возможности малым, чтобы измеряемый сигнал был достаточно велик, и достаточно большим, чтобы влияние вмещающих и покровных отложений было ослаблено. Для выбора оптимального времени рекомендуется использовать полные переходные характеристики, снятые в центральных частях аномальных зон или в пределах геологически изученных участков.

На отдельных интерпретационных профилях, пересекающих центральные части аномальных зон, следует на всех точках измерять поле на нескольких временах, обеспечивающих уверенное построение переходной характеристики в интервале от первых единиц до первых десятков миллисекунд.

Изображение и интерпретация результатов наблюдений. Результаты измерений представляют в виде карты расположения петель с характеристикой переходного процесса, наблюдаемого в каждой петле. В качестве такой характеристики в районах с сравнительно плохо проводящими рудовмещающими и покровными отложениями может быть использована амплитуда ε . д. с., наведенной в петле в момент измерения переходного процесса, отнесенная к силе тока, питающего петлю в импульсе.

Если измерения выполнялись на нескольких временах задержки, то в центре каждой петли изображают график зависимости $\varepsilon(t)/I$ (мкВ/А) от t (в мс).

Иногда целесообразно строить карты изолиний приведенного сигнала ε/I для различных моментов времени регистрации.

В районах со сложным геологическим разрезом, в которых переходные процессы от рудных залежей, а также рудовмещающих и покровных отложений практически накладываются друг на друга в течение всего времени измерения, результаты измерений целесообразно выражать в виде кажущейся проводимости γ_k .

Предварительно определяют безразмерный параметр τ_k , названный обобщенным кажущимся временем:

$$\tau_k(t) = \left(\frac{111,4}{\varepsilon(t)/IR} \right)^{2/3}, \quad (\text{XII.5})$$

где $\varepsilon(t)/I$ — приведенная амплитуда сигнала в петле в мкВ/А; R — половина длины стороны петли в м.

По вычисленному в соответствии с выражением (XII.5) значению τ_k получают

$$\gamma_k = 7,96t/R^2\tau_k; \quad (\text{XII.6})$$

здесь t — время регистрации в мс.

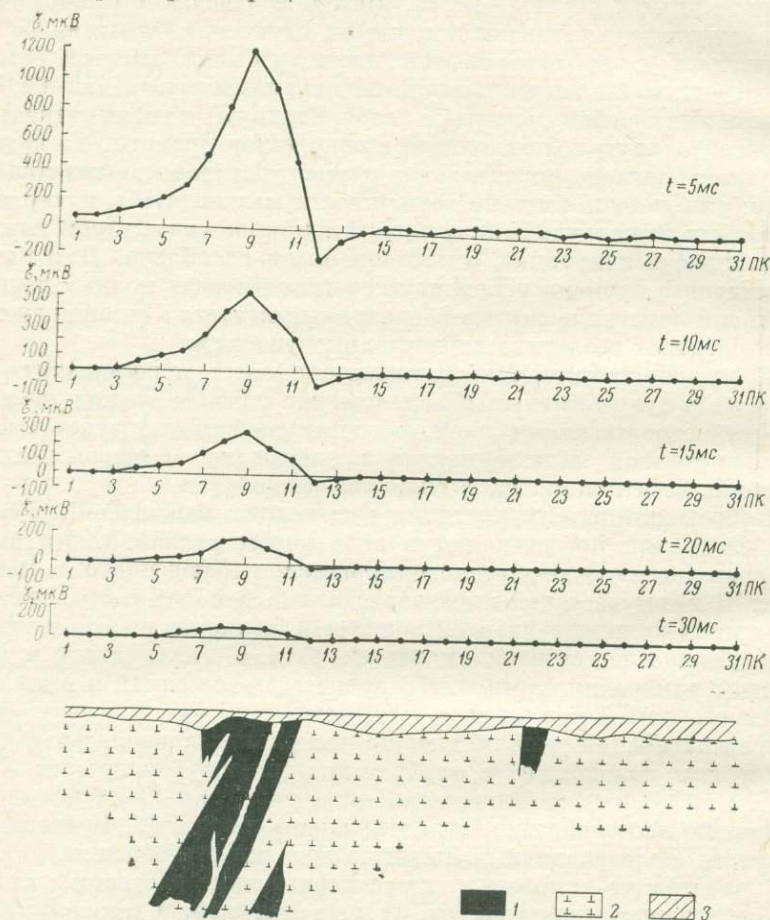


Рис. 208. Графики амплитуд неустановившегося сигнала вдоль профиля измерений.

1 — колчеданные руды; 2 — метаморфические сланцы; 3 — четвертичные отложения.

Величины γ_k относят на плане расположения петель к их центрам. В том случае, когда измерения выполняют на нескольких задержках, на плане в каждой петле строят график зависимости γ_k от t .

Интерпретация результатов общих съемок обычно носит качественный характер и имеет своей целью выделение площадей с аномально затянутыми переходными процессами. Такое выделение может быть выполнено путем качественного анализа описанных выше карт.

Наибольший интерес при поисках руд представляют локальные аномалии, захватывающие несколько смежных петель. Большие же по площади аномальные зоны обычно обусловлены увеличением продольной проводимости покровных отложений либо увеличением проводимости рудовмещающих пород.

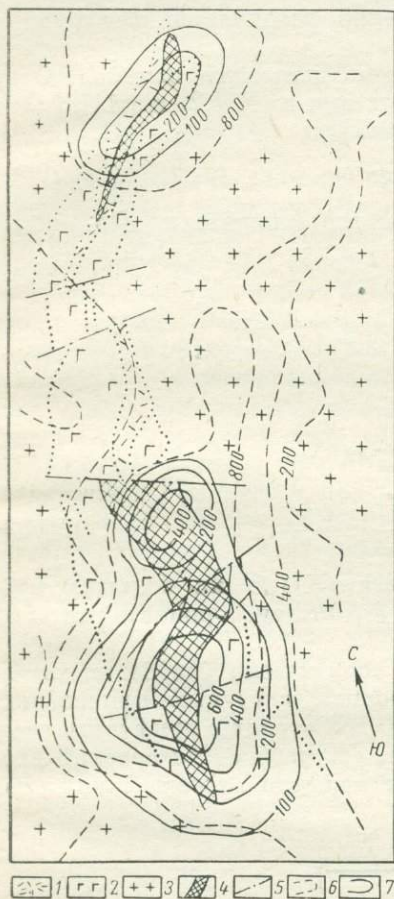


Рис. 209. Карта изолиний амплитуды неустановившегося сигнала на медноколчеданном месторождении (по Д. Ш. Садыкову и В. Ф. Сарбаш).

1 — альбитофиры; 2 — габбро-диабазы; 3 — гранодиориты; 4 — проекция рудных тел на поверхность; 5 — разрывные нарушения; 6, 7 — изолинии $\xi(t)/I$ для времен 1 и 2 мс.

По результатам детальных съемок строят также графики амплитуд неустановившегося сигнала для различных моментов времени вдоль съемочных профилей. Примеры таких графиков и карт приведены на рис. 208 и 209. Для центральных точек аномальных зон строят переходные характеристики $\xi(t)/I$.

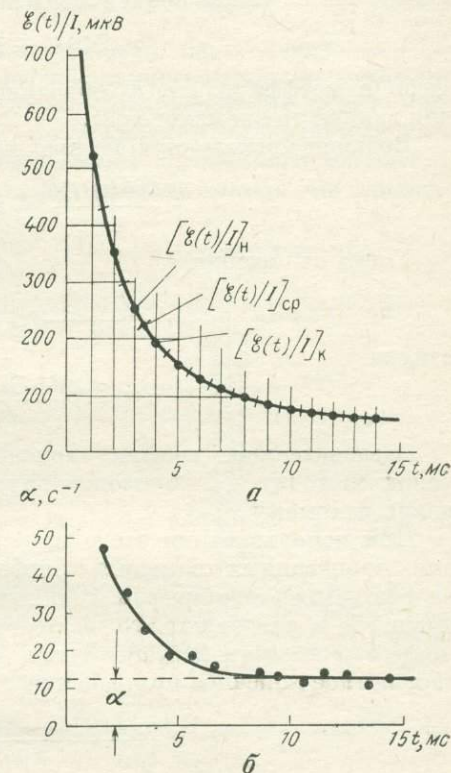


Рис. 210. Способ определения параметра α .

При оценке перспективности аномалий необходимо учитывать геологические данные и результаты работ другими геофизическими методами.

Одним из основных этапов интерпретации результатов детализационных исследований является определение обобщенного параметра источника аномального поля $\alpha_{\text{обобщ}}$, который в благоприятных геоэлектрических условиях существенно различается для рудных и нерудных объектов.

Для определения $\alpha_{\text{обобщ}}$ предложено несколько приёмов. Один из них основан на том, что в соответствии с (XII.2) и (XII.3) для достаточно больших времен характеристика

$$\mathcal{E}(t)/I = K\alpha e^{-\pi^2\alpha t};$$

здесь в коэффициенте K объединены все множители, постоянные для данной точки измерения.

Возьмем производную по времени:

$$\left| \frac{d[\mathcal{E}(t)/I]}{dt} \right| = K\pi^3\alpha^2 e^{-\pi^2\alpha t}.$$

Тогда отношение

$$\left| \frac{d[\mathcal{E}(t)/I]}{dt} \right| : \frac{\mathcal{E}(t)}{I} = \pi^2\alpha,$$

откуда

$$\alpha(t) = \left| \frac{d[\mathcal{E}(t)/I]}{dt} \right| : \frac{\mathcal{E}(t)}{I\pi^2}. \quad (\text{XII.7})$$

Следовательно, график зависимости (XII.7) на больших временах выходит на горизонтальную асимптоту, ордината которой равна искомому $\alpha_{\text{обобщ}}$.

При использовании этого приема практически удобнее вычисление производных заменить определением конечных приращений за 1 мс. Для этого график функции $\mathcal{E}(t)/I$ строят в арифметическом масштабе и разделяют его на отрезки, отвечающие интервалам времени в 1 мс (рис. 210, а). Затем для каждого отрезка вычисляют абсолютное конечное приращение

$$\left| \frac{[\mathcal{E}(t)/I]_{\text{к}} - [\mathcal{E}(t)/I]_{\text{н}}}{1 \text{ мс}} \right|,$$

где индексами «к» и «н» отмечены значения функции соответственно в конце и начале отрезка.

Полученные приращения делят на значение $\mathcal{E}(t)/I$ в средней точке отрезка, умноженное на $1/\pi^2$:

$$\left| \frac{[\mathcal{E}(t)/I]_{\text{к}} - [\mathcal{E}(t)/I]_{\text{н}}}{1 \text{ мс}} \right| : [\mathcal{E}(t)/I]_{\text{ср}} \cdot \frac{1}{\pi^2} = \alpha(t).$$

При этом вполне очевидно, что конечное значение $[\mathcal{E}(t)/I]_{\text{к}}$ предыдущего отрезка совпадает с начальным значением последующего отрезка.

По вычисленным величинам $\alpha(t)$ строят график (рис. 210, б), и по ординате его правой асимптоты определяют искомое значение обобщенного параметра $\alpha_{\text{обобщ}}$.

Для оценки глубины залегания источника аномалии используют кривые распределения горизонтальной и вертикальной составляющих поля, задаваясь при этом геологически обоснованной гипотезой о форме рудной залежи (пласт, сфера, цилиндр). Следует иметь в виду, что конечные результаты интерпретации носят оценочный характер в том смысле, который был придан этому термину ранее.

§ 4. СКВАЖИННЫЕ МОДИФИКАЦИИ ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДОВ

Необходимость поисков рудных залежей, залегающих на больших глубинах, недоступных для исследования наземными модификациями индуктивных методов, привела к разработке их скважинных вариантов. Сущность скважинных модификаций индуктивных методов иллюстрируется рис. 221. Источником переменного магнитного поля служит незаземленная петля, расположенная на дневной поверхности. Переменное магнитное поле этой петли изучают при помощи магнитоиндукционного датчика, перемещаемого вдоль скважины. Сигнал, наведенный в датчике, усиливается предварительным усилителем, расположенным в скважинном снаряде, передается на дневную поверхность по жилам кабеля, снова усиливается в наземном блоке аппаратуры и затем измеряется.

Исследования в скважинах могут выполняться при питании петли гармонически меняющимся током, а также в нестационарном режиме с периодически-импульсным возбуждением поля.

Для работы в гармонически меняющихся полях применяется комплект аппаратуры АСМИ.

Аппаратура АСМИ-1 может также быть использована для дипольного индуктивного профилирования вдоль оси скважины. В этом случае источником поля служит магнитный диполь (рамка), перемещаемый вместе с измерительным диполем вдоль скважины.

Для работы скважинной модификацией МПП можно применять комплект аппаратуры МППУ. Магнитоиндукционный датчик этого комплекта конструктивно выполнен в виде скважинного снаряда, диаметр и степень герметизации которого позволяют осуществлять измерения нестационарного поля в скважинах.

Выбор рабочих частот и времени регистрации нестационарного поля проводится так же, как при наземных работах.

Взаимное расположение петли, буровой скважины и изучаемого объекта определяется конкретной ситуацией, т. е. наличием

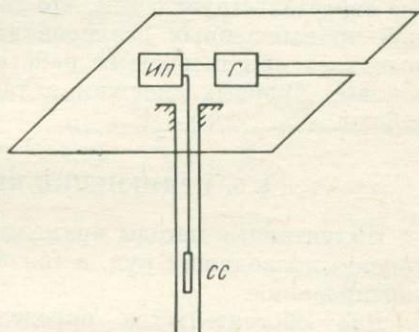


Рис. 221. Установка для работы скважинной модификацией индуктивных методов. СС — скважинный снаряд; ИП — измерительный пульт; Г — генераторная группа.

и расположением скважин, а также стремлением получить максимальное вторичное поле от токов, индуцированных в хорошо проводящих рудных залежах. В частности, петлю желательнее располагать так, чтобы ее первичное поле было перпендикулярно к максимальному сечению рудного тела. В этом случае поток первичного поля через проводящее тело будет максимален. Соответственно будет максимально вторичное поле.

Результаты скважинных наблюдений изображают в виде графиков наблюдаемого поля вдоль оси скважин, а также частотных или переходных характеристик аномального или вторичного поля. Приемы интерпретации этих материалов в целом сходны с приемами интерпретации результатов наземных наблюдений. Основное отличие заключается в более сложном характере получаемых результатов вследствие сложного пространственного взаимоположения источника поля, точек его наблюдения и объекта поисков.

Опыт применения скважинных модификаций индуктивных методов свидетельствует о том, что дальность обнаружения рудных залежей промышленных размеров достигает 100 м. Это обстоятельство позволяет при поисковых работах существенно разрядить сеть поисковых буровых скважин и таким образом удешевить поисковые работы.

§ 5. ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ МЕТОДОВ

Индуктивные методы применяются главным образом для поисков хорошо проводящих руд, а также для неглубинного геологического картирования.

Два обстоятельства определяют эффективность индуктивных методов как поисковых:

а) более высокая, чем у методов постоянного тока, глубинность, обусловленная возможностью снижения уровня аномалий-помех путем надлежащего выбора частоты или времени регистрации поля (в МПП к этому добавляется возможность измерения вторичных полей в момент отсутствия первичных);

б) высокая разрешающая способность в смысле определения геологической природы аномалий, связанная с возможностью оценки по результатам полевых наблюдений абсолютного (а не относительного, как в методах постоянного тока) значения удельного сопротивления геологических образований, создающих аномалии.

Индуктивные методы с успехом могут применяться для поисков так называемых слепых рудных тел, не выходящих под погребенный эрозионный срез.

В связи с отмеченным выше особенно эффективно использование индуктивных методов для поисков массивных медноколчеданных, медно-никелевых и колчеданно-полиметаллических руд.

В последнее время доказана эффективность применения индуктивных методов при поисках высокомагнитных руд, особенно в районах, где постоянное магнитное поле Земли осложнено остаточным

намагничением. Как было отмечено выше, в области достаточно низких частот аномалии в индуктивно возбужденном поле определяются индукционным намагничением. Таким образом, результаты, получаемые при этих условиях индуктивными методами, сходны с данными магнитной съемки, но выгодно отличаются от них отсутствием влияния остаточного намагничивания.

На рис. 212 в качестве примера сопоставлены аномалия магнитного поля Z над одним из железорудных месторождений в Приангарье и аномалия, полученная над тем же месторождением методом незаземленной петли. Остаточное намагничение в данном случае привело к инверсии знака аномалии ΔZ_a . Аномалия H_z , как всегда, над высокомагнитными залежами имеет положительный знак.

При геологическом картировании основное преимущество индуктивных методов заключается в простоте и мобильности установок, не имеющих заземленных элементов. Это определяет высокую производительность работ, особенно в районах с тяжелыми условиями заземлений и в зимнее время.

§ 6. ИНДУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Особенность индуктивных методов электроразведки заключается в том,

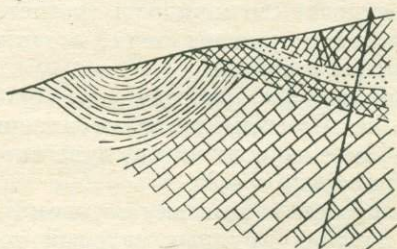
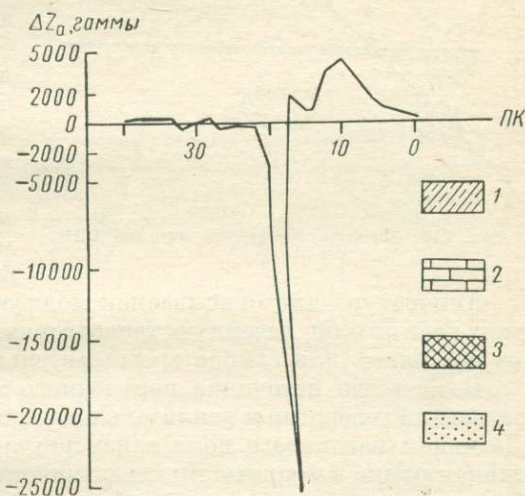
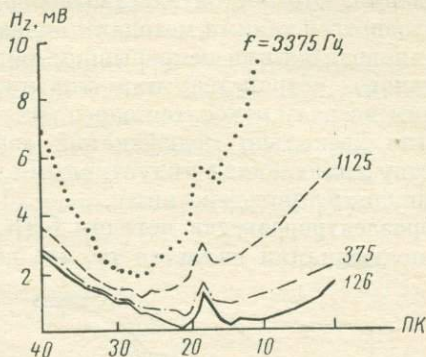


Рис. 212. Графики вертикальной составляющей магнитного поля незаземленной петли H_z и ΔZ_a над одним из железорудных месторождений.

1 — сланцы; 2 — известняки и доломиты; 3 — сплошное магнетитовое тело; 4 — вкрапленная магнетитовая руда.

что возбуждение электромагнитного поля и его измерение осуществляются при помощи установок, в которых необязательны заземления. Это обстоятельство позволяет создать такие устройства и пользоваться такими методами полевых работ, при которых съемка поля проводится при непрерывном движении источника поля и измерительного устройства или только измерительного устройства. К таким методам относится аэроэлектроразведка. В настоящее время известно несколько модификаций аэроэлектроразведки, по своему существу являющихся индуктивными. Краткая характеристика этих модификаций приведена ниже.

Аэроэлектроразведка методом БДК. Отличительной особенностью этой модификации является то, что первичное поле создается длинным (около 20 км) заземленным на концах прямолинейным кабелем, через который пропускается переменный ток звуковой частоты. Поле кабеля исследуется при помощи измерительной аппаратуры, буксируемой на вертолете, вдоль профилей, перпендикулярных к кабелю и расположенных на высоте, равной нескольким десяткам метров (рис. 213). Длина профилей 15—20 км.

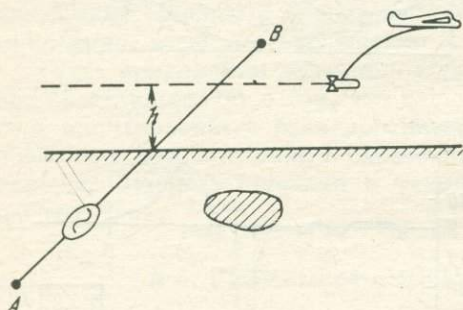


Рис. 213. Аэроэлектроразведка методом БДК.

Длина профилей 15—20 км.

Аппаратура для описываемой модификации аэроэлектроразведки включает в себя наземную генераторную группу и установленную на вертолете (или самолете) измерительную группу.

В качестве источника переменного тока используют ламповый задающий генератор и усилитель с выходной мощностью около 2 кВт. Датчиком магнитного поля в измерительной группе служит индуктивная рамка с ферритовым сердечником. Рамка вынесена в гондолу, буксируемую вертолетом на кабеле длиной 15—20 м.

Измерительная аппаратура, размещенная в кабине вертолета, обеспечивает возможность регистрации в полете действительной и мнимой компонент поля, а также сдвига его фазы относительно фазы тока в кабеле.

Аппаратура работает на рабочих частотах 81, 244, 976, 3904 Гц. Компоненты поля измеряются со средней погрешностью 2,5—4% (в зависимости от чувствительности), а фаза — с абсолютной погрешностью 1—2°.

Аэроэлектроразведку методом БДК применяют в настоящее время при поисках крупных залежей хорошо проводящих руд, а также при крупном и среднемасштабном геологическом картировании.

Аэроэлектроразведка методом дипольного индуктивного профилирования. Источником магнитного поля при аэроэлектроразведке этим способом является магнитный диполь, жестко закрепленный

на самолете (вертолете) или помещенный в буксируемую гондолу. Измерительный диполь в процессе съемки не изменяет своего положения относительно питающего диполя, т. е. перемещается одновременно с ним вдоль профиля.

Существуют различные модификации аэроэлектроразведки методом дипольного профилирования. В одной из них источником первичного поля служит рамка (магнитный диполь), закрепляемая между центрипланом самолета и его стабилизатором (рис. 214, а).

Измерительный диполь помещается в гондоле, буксируемой на трос-кабеле за самолетом, несущим генераторную рамку; длина

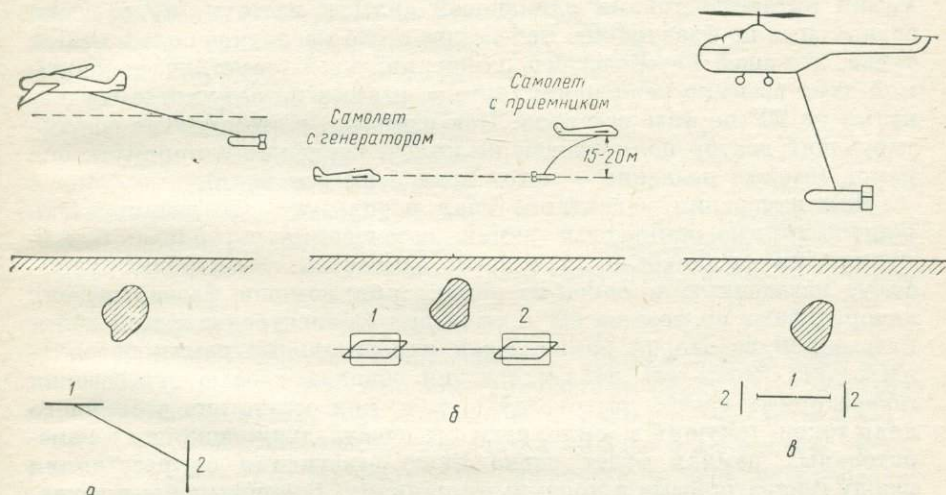


Рис. 214. Аэроэлектроразведочные модификации дипольного индуктивного профилирования. Диполи: 1 — генераторные; 2 — измерительные.

трос-кабеля 150—170 м. В этом же самолете помещена генераторная и измерительная аппаратура.

Комплект аппаратуры, применяемый при работе описываемым способом, позволяет возбуждать и измерять магнитное поле одновременно на двух частотах. В качестве рабочих частот может быть выбрана любая пара из 488, 976, 1956, 3904 и 7808 Гц. В процессе полета фиксируются амплитуда и фаза вертикальной составляющей магнитного поля либо ее мнимая компонента. Для уменьшения влияния первичного поля генераторной рамки на величину сигнала, компенсируют ту его часть, которая связана с прямым полем генераторной рамки. Таким образом, регистрируется та часть сигнала, которая связана с вторичным полем токов, текущих в земле.

Существенным недостатком описываемого способа аэроэлектроразведки является чувствительность измерительного устройства к взаимным относительным перемещениям самолета и буксируемой гондолы, ведущим к изменению уровня нормального поля и,

следовательно, к осложнению записи. Это обстоятельство снижает точность съемки, и таким образом, ограничивает глубинность метода.

От указанного выше недостатка в значительной мере освобождена другая модификация дипольного профилирования, называемая аэроэлектроразведкой методом вращающегося поля. Эта модификация отличается от описанной выше тем, что генераторные и приемные рамки установлены на двух самолетах, летящих друг за другом по профилю наблюдений (рис. 214, б). Для возбуждения поля применяются две соосные взаимно перпендикулярные рамки, имеющие равные магнитные моменты, т. е. одинаковые площадь и количество ампер-витков. Рамки питаются токами одинаковой силы и частоты, но взаимно сдвинутыми по фазе на 90° . Вследствие этого магнитное поле в любой точке, лежащей на общей оси рамок, является геометрической суммой двух взаимно перпендикулярных, равных по амплитуде и сдвинутых на 90° по фазе векторов. Как известно, в этом случае результирующий вектор поляризован по кругу, перпендикулярному к оси рамок (отсюда название — метод вращающегося поля).

Для измерения магнитного поля используют две взаимно перпендикулярные одинаковые рамки, помещенные в гондоле, буксируемой на трос-кабеле за вторым самолетом. Электродвижущую силу, наведенную в одной из рамок, при помощи фазовращателя поворачивают по фазе на 90° и вычитают из электродвижущей силы, наведенной во второй рамке. Если измерительные рамки расположить так, чтобы ось их пересечения совпала с осью пересечения генераторных рамок, то в воздухе, т. е. при отсутствии вторичного поля токов, текущих в земле, разность электродвижущих сил в измерительных рамках будет равна нулю независимо от расстояния между генераторными и приемными рамками. Вторичные поля токов, наведенные в земле, создают в приемных рамках сигналы, разность которых уже не равна 90° . Вследствие этого на измерительное устройство поступает сигнал разбалансировки, который используется для характеристики геоэлектрического разреза. Основным преимуществом метода вращающегося поля является возможность ослабления первичного поля в точке измерения за счет большого разнесения между генератором и приемником, а также использования первичного поля с круговой поляризацией. Основной недостаток — сложная система управления движением самолетов, необходимая для того, чтобы сохранялась соосность генераторных и приемных рамок.

Профилирование с жестко скрепленными генераторной и измерительными рамками также применяется при аэроэлектроразведке. В этой модификации две измерительные рамки расположены в вертикальной плоскости, а генераторная рамка — горизонтально (рис. 214, в). Взаимное расположение рамок выбрано так, чтобы первичное поле генераторных рамок не наводило сигнала в приемной рамке. Система рамок жестко скреплена между собой и помещена в гондолу, буксируемую вертолетом на трос-кабеле на высоте около 30 м над поверхностью Земли.

Аэроэлектроразведка методом переходных процессов (АМПП).
 В этой модификации аэроэлектроразведки используется нестационарное импульсно-периодическое магнитное поле, возбуждаемое при помощи генераторного контура, жестко укрепленного на летательном аппарате. Это поле измеряют при помощи измерительной рамки, буксируемой на трос-кабеле на некотором отдалении от летательного аппарата.

Несомненным преимуществом этой модификации аэроэлектроразведки является то, что отпадает необходимость в компенсации первичного поля, поскольку измерения ведутся в паузах между импульсами тока в генераторном контуре. Наряду с этим появляется необходимость компенсации сигнала в измерительной рамке, наводимого вихревыми токами в корпусе летательного аппарата, возникающими в моменты выключения тока в генераторном контуре.

Описываемая модификация электроразведки в настоящее время наиболее эффективна при поисках хорошо проводящих руд.

Аэроэлектроразведка методом переходных процессов широко применяется за рубежом (в Канаде) в самолетном варианте. В Советском Союзе разработан вертолетный вариант (рис. 215). Преимущество вертолета в качестве носителя аэроэлектроразведочной системы заключается в возможности выполнения съемок в масштабе 1 : 10 000. Это позволяет надеяться на то, что по мере внедрения АМПП в геологическую практику площадные поисковые наземные съемки будут заменены более производительными аэроэлектроразведочными.

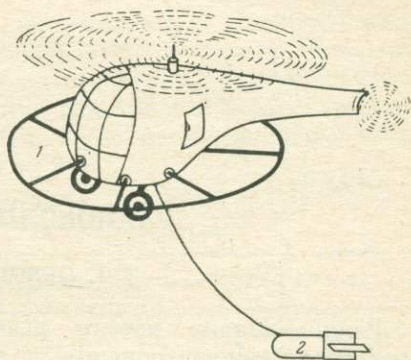


Рис. 215. Вертолетный вариант метода переходных процессов.

1 — генераторная рамка; 2 — гондола с измерительной рамкой.

РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ

§ 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Радиоволновые методы разведки основываются на изучении процессов распространения в горных породах электромагнитных волн, частоты которых изменяются в диапазоне 10^5 — 10^7 Гц, что отвечает длинам волн в воздухе соответственно 3000—30 м.

Электромагнитное поле, как показано в гл. IX, в значительной мере определяется электрическими свойствами среды. Во все выражения, определяющие поле, входит волновое число, зависящее от параметров среды γ , ϵ и μ .

Амплитудные значения электрической и магнитной компонент поля плоской электромагнитной волны определяются выражениями

$$E = E_0 e^{-br}, \quad H = H_0 e^{-br}, \quad (\text{XIII.1})$$

а электромагнитного диполя — выражениями

$$E = E_0 e^{-br}/r, \quad H = H_0 e^{-br}/r, \quad (\text{XIII.2})$$

где E_0 и H_0 — множители, характеризующие мощность источника; e^{-br} — множитель, определяющий убывание амплитуды компонент поля по мере распространения колебаний за счет поглощения энергии средой; b — коэффициент, называемый коэффициентом поглощения, который согласно выражению (IX.3) определяется частотой поля, электропроводностью, магнитной проницаемостью и диэлектрической постоянной среды.

Поглощаемая средой энергия расходуется на возбуждение вторичных (индуцированных) токов, плотность которых прямым образом зависит от проводимости пород. Поскольку же проводимость пород конечна, то вся поглощаемая энергия в конечном счете переходит в теплоту.

Таким образом, распространение электромагнитной энергии сопровождается явлениями поглощения и индукции. Их интенсивность

возрастает как с увеличением частоты, так и с ростом проводимости среды. Последнее обстоятельство и определяет возможности использования радиоволн для геологического картирования и поисков.

На наблюдении поглощения и связанного с ним ослабления поля основывается метод радиоволнового просвечивания, на наблюдении индукционных эффектов — метод радиокомпарации и пеленгации, или сокращенно — радиокип.

Отметим еще одно характерное обстоятельство. Скорость распространения электромагнитных колебаний v также зависит от свойств среды. С увеличением проводимости и диэлектрической постоянной, как это следует из формул (IX.13) и (IX.14), скорость уменьшается, что иллюстрируется табл. 7 (по А. И. Заборовскому).

Таблица 7

Среда (параметры даны в ед. СГСМ)	v , км/с		
	$f=50$ Гц	$f=5 \cdot 10^4$ Гц	$f=5 \cdot 10^8$ Гц
Вакуум ($\epsilon=1$, $\mu=1$, $\gamma=0$)	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$
Сухой песок ($\epsilon=2$, $\mu=1$, $\gamma=10^{-6}$)	2060	65 400	211 300
Влажная глина ($\epsilon=10$, $\mu=1$, $\gamma=10^8$)	212	6720	29 900

Так как длина волны электромагнитных колебаний

$$\lambda = v/f = c/f \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{1/2 [\sqrt{1 + (2\gamma/\epsilon f)^2} + 1]},$$

а длина волны в пустоте (воздухе)

$$\lambda_0 = c/f,$$

то длина волны в среде

$$\lambda_c = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{1/2 [\sqrt{1 + (2\gamma/\epsilon f)^2} + 1]}. \quad (\text{XIII.3})$$

Согласно формуле (XIII.3) длина волны в среде всегда меньше длины волны в пустоте. В табл. 8 приведены значения λ_c для различных величин λ_0 при разном удельном сопротивлении среды (по Д. С. Даеву).

Таблица 8

λ_0 , м	λ_c , м			
	$\rho=500$ Ом·м	$\rho=1000$ Ом·м	$\rho=5000$ Ом·м	$\rho=10\,000$ Ом·м
100	30,3	33,33	35,66	35,67
500	85,6	113,33	178,3	178,33
1000	125,0	170,0	303,0	356,7

Необходимость учета изменения длины волны электромагнитных колебаний при прохождении их через толщу исследуемых пород

вызывается тем, что на наблюдаемые эффекты оказывает влияние также и соотношение длин волн и геометрических размеров отдельных геологических включений (рудных тел, линз и др.), чем обуславливается возникновение дифракционных явлений.

В методе радиокип для исследования используют поля радиовещательных станций, удаленных на десятки и сотни километров от района работ, поэтому наблюдения проводятся при $r \gg \lambda_0$, в так называемой дальней зоне станции.

В методе радиоволнового просвечивания исследуется электромагнитное поле автономного передатчика и наблюдения проводятся на расстояниях r , соизмеримых с длиной волны (в породе), т. е. в так называемой промежуточной зоне.

§ 2. МЕТОД РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Сущность метода радиоволнового просвечивания поясним следующими примерами.

При проводке разведочных и эксплуатационных горных выработок, а также при бурении разведочных скважин часть рудных тел и иных объектов поисков оказывается в пространстве между горными выработками и скважинами и таким образом остается необнаружен-

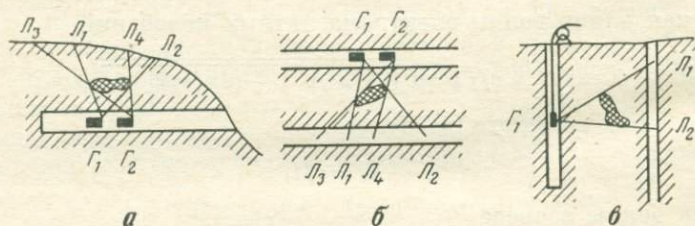


Рис. 216. Методы радиоволнового просвечивания.

Просвечивание: а — из штольни на дневную поверхность, б — между штольнями, в — между скважинами.

ной. Используя различие коэффициентов поглощения вмещающих пород и искоемых объектов, можно «просветить» электромагнитными волнами исследуемое пространство и по степени поглощения энергии передатчика установить наличие или отсутствие рудных тел или иных геологических образований в толще окружающих отложений.

Пусть между дневной поверхностью и штольной среди плохо проводящих пород находится рудное тело высокой проводимости, наличие и положение которого надо определить (рис. 216, а). С этой целью в штольне в точке Γ_1 помещают передатчик, а на дневной поверхности изучают поле этого передатчика. Вследствие поглощения электромагнитных волн рудным телом на дневной поверхности образуется зона, в пределах которой прием будет либо совершенно отсутствовать, либо в значительной мере окажется ослабленным (зона электромагнитной тени). Границы этой зоны отмечены на

рис. 216, а буквами L_1 и L_2 . Если переместить затем генератор в новое положение G_2 , границы тени на дневной поверхности изменятся и определятся в этом случае лучами L_3 и L_4 . В положении генератора G_3 тень ограничится лучами L_5 и L_6 и т. д. Нетрудно заметить, что по положению лучей, ограничивающих конус тени, можно приблизительно определить положение рудного тела.

На рис. 216, б изображен случай, когда просвечивание производится из одной штольни в другую. На рис. 216, в для этой цели использованы две буровые скважины. Возможен также вариант просвечивания из буровой скважины на дневную поверхность.

Аппаратура для метода просвечивания состоит из передатчика с рамочной антенной и измерителем мощности излучаемой энергии (например, измерителем тока в генераторной рамке) и приемника, также снабженного измерителем сигнала.

Модификацию радиоволнового просвечивания между горными выработками или между выработкой и поверхностью Земли называют шахтным радиопросвечиванием, а просвечивание между скважинами или между скважиной и дневной поверхностью — скважинным радиопросвечиванием.

Аппаратура. Аппаратура, применяемая для радиоволнового просвечивания, характеризуется повышенной стабилизацией частоты генератора и коэффициента усиления приемника; желательное применение замкнутых антенн, так как параметры открытых (штыревых) антенн сильно зависят от расстояния между антенной и стенкам выработки (т. е. емкости антенна — Земля). Аппаратура должна обладать повышенной влагостойкостью. Скважинная аппаратура, помимо того, должна быть герметизирована и удовлетворять специфике наблюдений в скважине (дистанционное управление, автономное питание).

Серьезные затруднения создает волноводный эффект — вынос энергии по объему горной выработки или стволу скважины. В результате резко ослабевает поле в просвечиваемых породах, уменьшается глубинность исследований и интенсивность аномальных эффектов, а выносимая энергия, усиливая поле вблизи приемника и интерферируя с проходящими колебаниями, искажает результаты наблюдений. На рис. 217 видно, что отсос энергии боковыми выработками сказался на графике напряженности поля вдоль главной штольни образованием ступенчатых спадов.

В шахтном просвечивании эта помеха преодолевается введением поправки, а при большом пути обходной волны с ее влиянием можно практически не считаться. В скважинном варианте просвечивания вынос энергии сводят до минимума применением специальных заграждающих фильтров, своеобразных электромагнитных пробок.

Другой существенной помехой при просвечивании в подземных выработках является вынос энергии по искусственным проводникам — троллеям, трубопроводам, рельсам, из которых наибольшее влияние оказывают незаземленные проводники. Способы преодоления этой помехи рассматриваются ниже.

Для шахтного радиопросвечивания выпускается комплект аппаратуры АРШ-1 (рис. 218), состоящий из передатчика I с антенной 3 и приемника II с антенной 6.

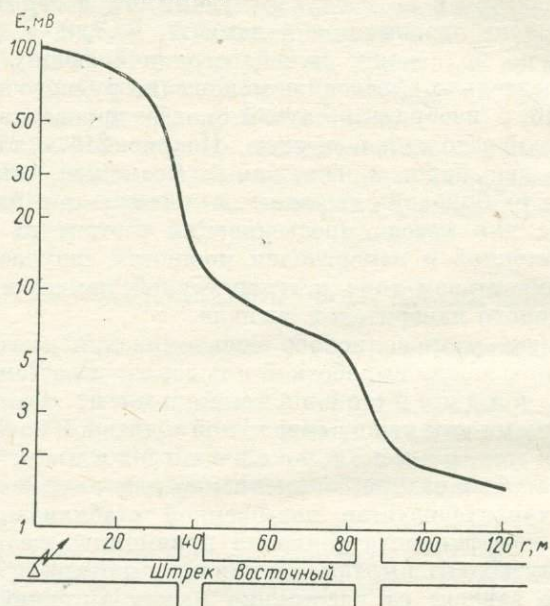


Рис. 217. Влияние волноводного эффекта боковых выработок.

Передатчик состоит из задающего генератора 1 с кварцевой стабилизацией и усилителя мощности 2. Питание передатчика осуществляется от аккумуляторной батареи 5 через транзисторный

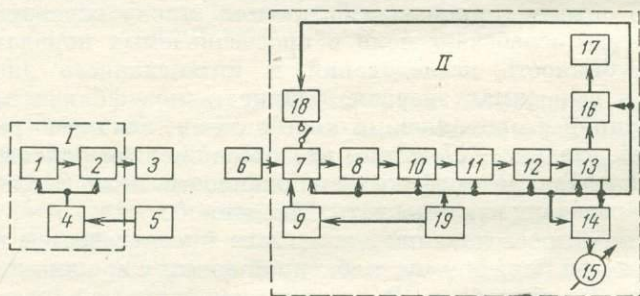


Рис. 218. Блок-схема аппаратуры АРШ-1.

преобразователь 4. Выход передатчика рассчитан для работы со штыревой или рамочной экранированной антеннами.

Приемник собран по супергетеродинной схеме с однократным преобразователем частоты и состоит из смесителя 7, аттенюатора 8, гетеродина 9, трех каскадов усиления по промежуточной частоте 10—

12, детектора 13, усилителя постоянного тока 14, стрелочного индикатора 15, усилителя звуковой частоты 16 и головного телефона 17 для слухового контроля работы приемника. Калибровка и контроль чувствительности обеспечиваются калибратором 18.

Питание осуществляется от сухой батареи 19, расположенной в корпусе приемника.

В качестве приемных антенн используют одну штыревую и четыре съемные рамочные антенны, настроенные на одну из рабочих частот. В комплект аппаратуры АРШ-1 входит также зарядное устройство — выпрямитель ВСА-10.

Аппаратура АРШ-1 имеет также устройство для согласования параметров приемной антенны с параметрами входа приемника. Благодаря этому можно проводить просвечивание между выработкой и скважинами подземного бурения. Для этого приемную антенну вводят в скважину при помощи специальной штанги-удлинителя.

При отсутствии серийной аппаратуры для шахтного просвечивания в качестве передатчика можно использовать любой широкодиапазонный генератор, удовлетворяющий указанным выше требованиям и работающий на фиксированных, стабилизированных частотах. Для измерений в этом случае применяют стандартный, выпускаемый радиопромышленностью измеритель помех ИП-12М. Он представляет собой супергетеродинный приемник с микровольтметром на выходе. Диапазон измеряемых частот 0,15—20 МГц, пределы измерения 1—10² мкВ. Питание осуществляется от сухих батарей. Измеритель помех выпускается с открытой антенной, поэтому необходимо переделывать вход прибора для работы с магнитной антенной (экранированной рамкой или соленоидом с ферритовым сердечником).

Для скважинного радиопросвечивания разработана серия аппаратуры СРП. В настоящее время выпускается модель СРП-7. В отличие от предыдущих моделей, аппаратура СРП-7 имеет наименьший диаметр и обладает повышенной теплостойкостью, что позволяет применять ее в скважинах диаметром до 46 мм и глубиной до 2000 м.

Передатчик работает на фиксированных частотах от 0,15 до 40 МГц; чувствительность приемника не хуже 0,5 мкВ на всю шкалу. Питание осуществляется от аккумуляторов. Аппаратура может быть вмонтирована в комплект типовых каротажных станций; она может использоваться также в переносном варианте с ручными лебедками.

Методика шахтного радиопросвечивания. Работы начинаются с опытных наблюдений, проводимых с целью определения коэффициента поглощения для вмещающих пород, дальности действия аппаратуры в данных геологических условиях, характера и степени влияния на электромагнитное поле известных рудных тел (или других объектов исследований), а также для выбора оптимального диапазона частот и шага наблюдений. Необходимо также установить возможность появления ложных аномалий от каких-либо геологических образований, также хорошо проводящих, но не являющихся

объектом поисков. В этом случае стремятся найти способы классификации аномалий в первую очередь посредством рационального выбора частот. Однако следует отметить, что задача определения природы аномалий и разделения их на «рудные» и «нерудные» является очень трудной и далеко не всегда разрешимой.

Для определения коэффициента поглощения b измеряют напряженность поля E на участке, где по имеющимся геологическим данным вмещающие породы наиболее однородны и не содержат объектов поисков. Измерения проводят при двух расстояниях между генератором и приемником.

При радиоволновом просвечивании антенну передатчика рассматривают как электромагнитный диполь, поэтому при первом наблюдении в соответствии с формулой (XIII.2)

$$E_1 = E_0 e^{-br_1} / r_1,$$

а при втором наблюдении —

$$E_2 = E_0 e^{-br_2} / r_2.$$

Поделив одно выражение на другое, прологарифмировав их отношение и умножив на 2,3, получим значение

$$b = 2,3 \frac{\lg \frac{E_1 r_1}{E_2 r_2}}{r_2 - r_1}, \quad (\text{XIII.4})$$

выраженное в Нп/м.

Для устранения случайных погрешностей и определения поглощающих свойств всех пород, встречающихся в районе работ, измерения повторяют многократно, на разных участках и с разными расстояниями r .

Дальность действия аппаратуры для полученных значений определяют при помощи диаграммы, изображенной на рис. 219.

На диаграмме вычерчено семейство кривых $E = \psi(r)$, выражаемых формулой (XIII.2), при различных значениях коэффициента b для двух величин мощности W передатчика — 15 и 1 Вт. Взяв некоторый минимальный уровень напряженности поля (на рис. 219 — 1 мкВ) и проведя горизонтальную прямую на этом уровне, по абсциссе точки пересечения этой прямой с кривой для данного значения b определим искомую дальность. Сравнивая величины r для $W = 15$ Вт и 1 Вт, можно оценить влияние изменения мощности передатчика на дальность действия аппаратуры (при заданном значении b). Как видно, относительные изменения дальности действия аппаратуры $\Delta r/r$ не превышают 10%.

При просвечивании известных проводящих объектов устанавливают не только оптимальную частоту и шаг наблюдений, но и влияние выноса энергии по искусственным проводникам. Экранирующее действие оказывают искусственные проводники и на антенну приемника. Наибольшее влияние оказывают незаземленные кабели, троллеи, меньшее — трубопроводы; хорошо заземленные рельсы

мешают обычно слабее всего. Для уменьшения этого влияния передатчик и приемник располагают возможно дальше от проводников, ориентируя плоскости рамочных антенн перпендикулярно к продольной оси проводников, повышают частоту поля в пределах,

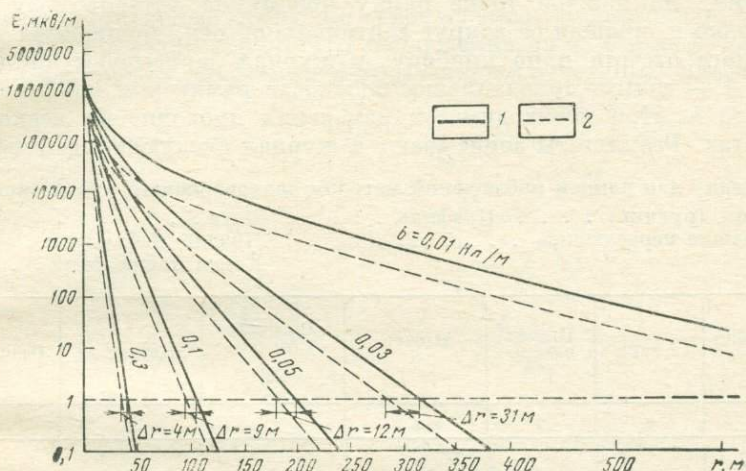


Рис. 219. Диаграмма определения дальности действия аппаратуры.
Кривые $E = \psi(r)$: 1 — для $W = 15$ Вт, 2 — для $W = 1$ Вт.

допускаемых требуемой дальностью. Наиболее эффективным способом является применение закороток, посредством которых искусственные проводники заземляют, присоединяя к рельсам или хорошо заземленным штырям, вбитым в породу. При закорачивании троллеев в закоротку включают бумажные конденсаторы на напряжение

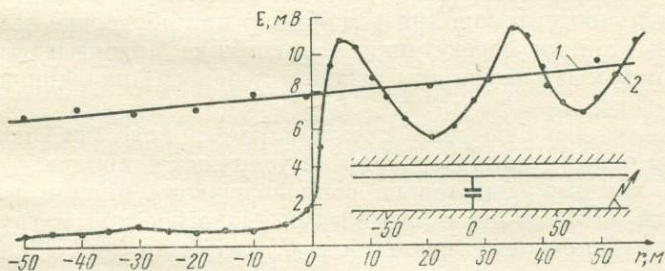


Рис. 220. Действие закороток на вынос энергии по троллею.
Напряжение в троллее: 1 — без закоротки, 2 — с емкостной закороткой.

до 500—1000 В и емкостью до 0,5 мкФ. Закоротки располагают вблизи профилей наблюдений. Чем действительнее закоротки, тем в меньшей степени возрастает принимаемый сигнал с приближением приемника к проводнику. Эффективность действия закороток проверяется измерениями с приемником (рис. 220). На отрезке троллея

между передатчиком и закороткой образуются стоячие волны, а за закороткой в троллее происходит резкий спад напряжения. Закоротки входят в комплект аппаратуры АРШ-1.

Производственные работы проводятся по всем доступным выработкам с учетом методических выводов, полученных при опытных работах. На каждой точке рамку приемника устанавливают вертикально и, вращая ее вокруг вертикальной оси, добиваются максимального отсчета n по прибору; в журнал записывают также пеленг A — азимут ориентировки плоскости рамки при максимальном отсчете n . При необходимости измерения проводят на нескольких частотах. Результаты записывают в журнал следующей формы.

Журнал для записи наблюдений методом радиоволнового просвечивания

Участок (рудник) Профиль Дата
 Положение передатчика Начало наблюдений
 Конец наблюдений

№ точки (пикета)	f , мГц	Предел измерений	Отсчет n	Средний отсчет $n_{ср}$	Пеленг A	Примечание
1	2	3	4	5	6	7

Оператор Вычислитель Проверил

В графу 3 записывают чувствительность (предел), при которой брался данный отсчет по шкале прибора, в графу 4 — отсчет, в графу 6 — пеленг. Графа 5 содержит отсчеты, приведенные к одной чувствительности, и заполняется обычно при обработке наблюдений.

Точки стоянки передатчика и приемника привязывают к маркшейдерским и геодезическим реперам и наносят на маркшейдерские планы.

Результаты наблюдений представляют в виде графиков напряженности поля (в микровольтах или условных единицах — делениях шкалы), которые обязательно сопровождаются планом расположения точек наблюдений с элементами геологической и горно-технической (трубопроводы, троллеи и т. п.) ситуации (рис. 221).

Интерпретация заключается в выделении аномальных зон, установлении местоположения и примерных размеров проводящих объектов. Интерпретацию выполняют способом сравнения и лучевым способом. Оба способа основываются на предположении, что электромагнитная энергия от передатчика к приемнику распространяется по прямолинейным направлениям — лучам.

Способ сравнения. При исследовании этим способом наблюденные кривые сравнивают с так называемыми кривыми нормального поля,

которые вычисляют в предположении наличия на данном участке наблюдений однородной среды. С этой целью для каждой точки стояния приемника, зная его удаление от передатчика r и коэффициента поглощения b , вычисляют по формуле (XIII.2) значение E . Сопоставляя кривые — экспериментальную и нормального поля, выявляют аномальные зоны по уменьшению (ослаблению) поля. На рис. 221 показаны результаты наблюдений на одном из рудников Забайкалья. Между пикетами 5 и 7 выделяется отчетливая аномалия.

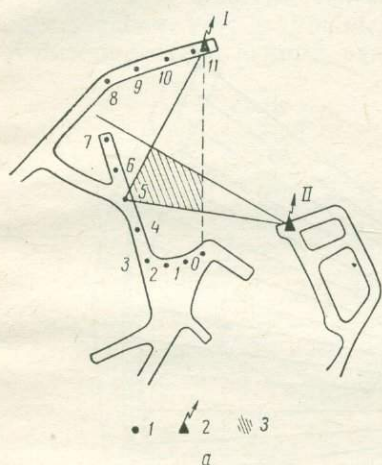
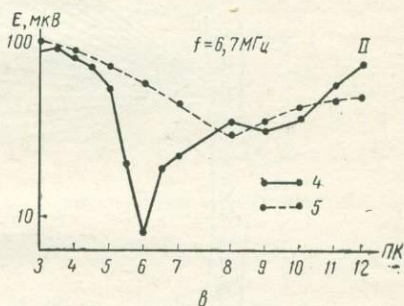
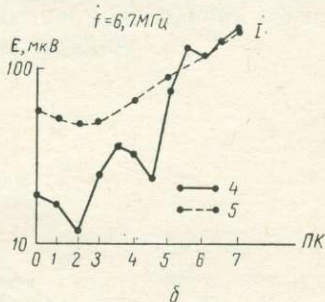


Рис. 221. Пример выявления аномалии на Забайкальском руднике.

a — план расположения точек наблюдений; график напряженности поля при наблюдении: b — со стоянки I, a — со стоянки II; 1 — точки наблюдений; 2 — стоянки генератора; 3 — область тени; 4 — наблюдаемый график; 5 — график нормального поля.



Соединяя на плане прямыми линиями точки, ограничивающие аномальную зону, с точки стояния передатчика получают теневой сектор, внутри которого должно находиться экранирующее, хорошо проводящее тело. Пересечением теневых секторов уточняют местоположение оси или контура объекта. В связи с этим все аномальные зоны, выявляемые в процессе съемок, обязательно наблюдают вторично с других стоянок генератора.

Лучевой способ. Основан на следующих положениях. В однородной среде напряженность поля определяется выражением (XIII.2).

В неоднородной среде, в том числе и при наличии проводящих поглощающих тел, поле ослабляется. Это ослабление зависит от проводимости и мощности (размеров) экрана и может быть учтено введением множителя $1/\mathcal{E} < 1$.

Тогда

$$E_k = E_0 \frac{e^{-br}}{r} \cdot \frac{1}{\mathcal{E}}, \quad (\text{XIII.5})$$

где E_k — поле при наличии этого тела.

Разделив первое выражение на второе, получим

$$E/E_k = \mathcal{E}. \quad (\text{XIII.6})$$

Величину E_k определяют путем непосредственных измерений поля в точках наблюдения. Значение E вычисляют для тех же точек при помощи выражения (XIII.2) по известному значению b и данной величине r , поле E_0 находят путем измерения сигнала у антенны передатчика. Результаты вычисления коэффициента изображают

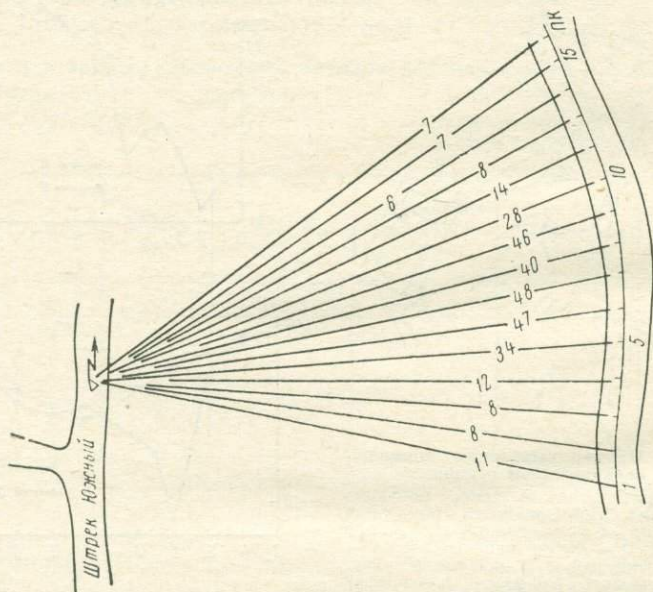


Рис. 222. Лучевая диаграмма.

Цифры у лучей — значения коэффициента экранирования \mathcal{E} .

в виде лучевых диаграмм (рис. 222). Для этого на плане расположения точек наблюдений проводят прямые, соединяющие точку стояния передатчика с точками наблюдений, и на каждом луче пишут значение \mathcal{E} . Лучи с повышенными значениями этого коэффициента определяют теневой сектор, в котором и располагается искомый объект.

Явления дифракции. При работе методом радиоволнового просвечивания не всегда наличие проводящих объектов отмечается «радиотенью». Расстояние между передатчиком и генератором практически измеряется десятками и реже первыми сотнями метров, а длины волн (3000—30 м) в породе уменьшаются. Вследствие этого наблюдения выполняют в условиях соизмеримости величин r и $\lambda_{\text{ср}}$, что и обуславливает возникновение дифракции (огибания радиоволнами) проводящих объектов с последующей интерференцией колебаний по другую сторону тела. В связи с этим при радиопро-

свечивании могут наблюдаться также и относительные максимумы (усиления сигналов) на фоне общей радиотени. На рис. 223 в качестве примера изображены графики модельных измерений при просвечивании проводящего шара диаметром $d = \lambda_{\text{ср}}$ и находящегося на расстоянии $l = 2\lambda_{\text{ср}}$ от передатчика. На графиках E отчетливо виден максимум в области тени, амплитуда которого уменьшается с удалением профиля наблюдений от шара. Если бы мы не учитывали дифракции, то данную аномалию ошибочно проинтерпретировали бы как связанную с двумя телами (на графике — два минимума E). Таким образом, учет возможных дифракционных явлений обязателен при интерпретации данных радиопросвечивания.

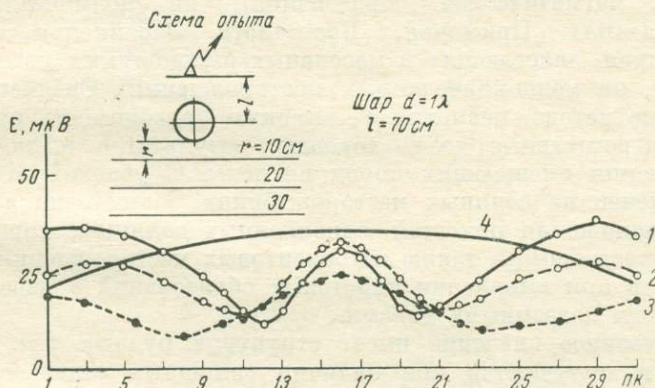


Рис. 223. Дифракционные явления на модели проводящего шара (по Д. С. Даеву).

1 — $r = 10 \text{ см}$; 2 — $r = 20 \text{ см}$; 3 — $r = 30 \text{ см}$; 4 — $r = 5 \text{ см}$.

Методика скважинного просвечивания. Общие положения методики при скважинном просвечивании те же, что и при шахтных исследованиях. Производственным съемкам также предшествуют опытные наблюдения для определения коэффициента поглощения, выбора оптимальных частот, шага наблюдений, параметров заграждающих фильтров.

Отличия в технике работ обуславливаются только спецификой скважинной аппаратуры. Наблюдения ведут как при неподвижном передатчике и передвигающемся приемнике, так и наоборот. Иногда применяется методика параллельного перемещения передатчика и приемника. При работе с комплектом СРП-7 наблюдаемые значения E регистрируются самописцем автоматически и поэтому просвечивание ведется в движении. Результаты наблюдений изображают в виде как графиков E вдоль ствола скважины при неизменном положении передатчика (аналогично каротажным диаграммам), так и лучевых диаграмм.

Применение метода. Метод применяют в основном для поисков слепых рудных тел в пространстве между выработками и скважинами

или для прослеживания вскрытых рудных тел в процессе как разведки, так и эксплуатации месторождений. Эффективность метода тем выше, чем больше различие по проводимости искомым объектам и вмещающих пород. Они должны различаться по проводимости по меньшей мере в 2—3 раза. Однако существенное значение имеет и абсолютная величина проводимости. Наилучшие результаты получают, когда удельное сопротивление руд меньше $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и вмещающих пород более $1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. При сопротивлении пород меньше $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ просвечивание в настоящее время практически неосуществимо. Метод был успешно применен на медно-никелевых месторождениях Кольского полуострова (вмещающие породы — ультраосновные магматические образования), на полиметаллических месторождениях Приморья, Восточного Забайкалья, Красноярского края, залегающих в массивных высокоомных известняках. Наоборот, на медноколчеданных месторождениях Среднего Урала применение метода, несмотря на высокую проводимость руды, слагающей агрегативные тела, хороших результатов из-за низкого сопротивления вмещающих пород не дало. С успехом этот метод был применен на соляных месторождениях Соликамска для определения положения полостей, заполненных соляным, хорошо проводящим раствором, а также на бокситовых месторождениях Северного Урала при выявлении карстовых образований в известняках, заполненных подземными водами.

Существенное значение имеет структура рудных тел. Лучшие результаты получаются при наличии сплошных залежей, однако при надлежащем соблюдении методики можно выявить и вкрапленное оруденение. Расположение передатчика и приемника играет роль в том отношении, что линии распространения радиоволн должны быть по возможности ортогональны направлениям простирания рудных тел.

В последние годы положительные результаты получены при выявлении объектов ограниченной (конечной) проводимости, представленных слабоминерализованными зонами и содержащих рассеянное оруденение.

§ 3. МЕТОД РАДИОКИП

В методе радиокип передающая радиостанция может рассматриваться как электромагнитный диполь, излучающий сферическую волну (рис. 224, а). По мере удаления от радиостанции кривизна сферической волны постепенно уменьшается, и на достаточно большом удалении фронт ее становится плоским и ориентированным вертикально. Вектор электрической компоненты E электромагнитной волны в каждой точке такого фронта направлен по вертикали, а магнитной компоненты — по горизонтали, причем оба вектора перпендикулярны к направлению распространения волны r (рис. 224, б). Пронизывая верхние слои земной коры, радиоволна индуцирует в толщах горных пород вторичные электрические токи вихревого

характера, интенсивность (сила) которых при прочих равных условиях пропорциональна проводимости этих пород. Переменное магнитное поле этих индуцированных токов накладывается на первичное поле электромагнитной радиоволны, искажая его и тем самым создавая аномальные эффекты. В соответствии с законом электромагнитной индукции наиболее сильные вторичные токи будут индуцироваться в тех геологических телах, которые обладают наибольшей проводимостью, залегают вертикально и ориентированы возможно более близко к линии распространения радиоволн.

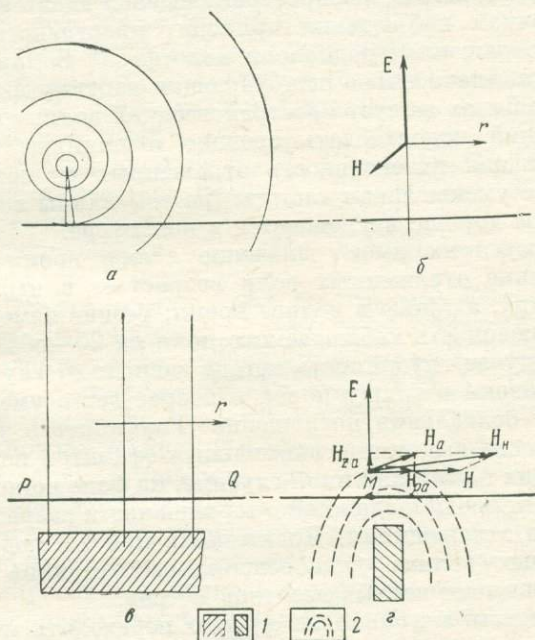


Рис. 224. Проводящий пласт в поле дальней радиостанции.
1 — проводящий пласт; 2 — магнитные силовые линии.

Пусть на участке PQ залегают крутопадающий рудный хорошо проводящий пласт, простирание которого совпадает с направлением r (рис. 224, a). В произвольной точке M у поверхности земли вблизи рудного пласта кроме вектора первичного поля H будет действовать вектор вторичного магнитного поля H_a , направленный по касательной к силовым линиям магнитного поля токов в пласте (см. рис. 224, z ; плоскость рисунка перпендикулярна к линии r). В результате сложения обоих векторов в точке M будет наблюдаться суммарное поле H_n , по величине и направлению отличающееся от первичного поля.

Очевидно, что аномальные эффекты легче обнаружить, когда первичное поле однородно. Этого можно добиться, если наблюдать поле такой радиостанции, которая удалена от участка исследований

на достаточно большое по сравнению с его линейными размерами расстояние (практически на расстояние не менее 200—250 км). Тогда в соответствии с (XIII.1) в пределах участков протяженностью до первых десятков километров интенсивность первичного поля практически будет постоянна.

Как следует из рис. 224, *г*, в точке наблюдений у поверхности земли появляются аномальная вертикальная составляющая H_{z_a} и аномальная горизонтальная составляющая H_{p_a} , накладывающаяся на вектор первичного поля H .

Кроме прямой волны, распространяющейся вдоль земной поверхности, к точкам наблюдения приходит пространственная волна, связанная с отражением радиоволн ионосферой Земли. Происходит интерференция, значительно осложняющая картину явления. Чтобы избавиться от помех за счет пространственной волны, целесообразно для наблюдений использовать средние и длинные волны ($\lambda_0 > 300$ м), так как интенсивность отраженных от ионосферы волн уменьшается с уменьшением частоты (ростом длины волны), а более длинные волны хорошо поглощаются в ионосфере.

При наблюдениях имеют значение также время и состояние погоды. Влияние отраженных волн возрастает в периоды восхода и захода солнца, а также в ночное время; резкие изменения погоды меняют напряженность наблюдаемого поля на 20—50%.

В общем случае глубинность метода зависит от глубины проникновения радиоволн в толщу пород и возрастает с уменьшением частоты за счет ослабления поглощения. Глубинность зависит также и от возможности выделения аномальных эффектов искомым объектом, залегающим на той или иной глубине, на фоне помех — аномальных эффектов от неоднородностей в верхней части разреза, сложенной четвертичными отложениями. Практически при наблюдении на средних и длинных волнах радиовещательных станций глубинность обычно не превышает первых десятков метров.

Для повышения глубинности следует переходить на наблюдение сверхдлинноволновых (так называемых коммерческих) станций, работающих на длинах волн свыше 5 км (частота 60—40 кГц). Как показывает опыт наблюдений, глубина исследований существенно возрастает (в отдельных случаях до 100 м и более). Такие станции с большим радиусом действия (от 5 тыс. км и более) имеются в СССР и во многих пунктах мира.

Аппаратура. Свое название метод получил от способа измерения напряженности поля радиоволн. Он заключается в сравнении (компарировании) измеряемого сигнала с эталонным, вырабатываемым генератором измерительного устройства. В качестве приемника-измерителя применяется полевой измеритель напряженности поля (ПИНП-2); при его отсутствии можно использовать измеритель помех ИП-12М.

Измеритель ПИНП-2 (рис. 225) представляет высокоизбирательный микровольтметр, собранный по супергетеродинной схеме на полупроводниковых диодах. В схеме предусмотрена температур-

ная стабилизация режима работы полупроводниковых триодов. Прибор снабжен поворотной магнитной антенной с круглым уровнем в торце и вертикальным лимбом для определения углов ее наклона и динамиком для контроля за работой радиостанции на слух. Отсчет измеряемых величин напряженности электромагнитного поля проводится по стрелочному индикатору. Диапазон измерений по частоте — от 150—450 кГц, по напряжению сигнала — от 0,3 до 1000 мкВ. Источники питания — два элемента КБ-0,5.

В рабочем положении прибор закрепляется на груди оператора посредством ремней. Масса прибора около 3,5 кг.

Для наблюдения полей коммерческих сверхдлинноволновых станций служит специальный измеритель — сверхдлинноволновой радиоприемник СДВР-3. Высокая чувствительность прибора позволяет вести измерения полей радиостанций, находящихся на расстоянии до 10 000 км, т. е. практически в любой точке земного шара.

Прибор СДВР-3 состоит из магнитной рамочной антенны, горизонтального электрического диполя (электрической антенны), антенного лампового усилителя и микровольтметра на транзисторах.

Магнитная антенна служит для измерения напряженности магнитной компоненты радиоволнового поля, электрическая антенна — для измерения электрической компоненты. При измерениях обе антенны поочередно подключают к антенному усилителю, соединенному экранированным шлангом с микровольтметром.

В схеме микровольтметра предусмотрено преобразование измеряемого сигнала в сигнал звуковой частоты при помощи одного гетеродина. Преобразованный на звуковую частоту сигнал выпрямляется и через накопительную ячейку поступает в головной телефон (для слухового контроля за работой радиостанции) и измерительный прибор. Накопительная ячейка предназначена для накопления сигналов и их сглаживания, что позволяет измерять средний уровень поля, снижая тем самым влияние помех. Ячейка снабжена регулятором постоянной времени накопления от 0,1 до 9 с; благодаря этому при низком уровне флуктуаций поля можно сократить время отдельного измерения.

Магнитная антенна вместе с антенным усилителем может вращаться вокруг горизонтальной оси; угол наклона определяется по вертикальному лимбу. На шкале прибора имеется круглый уровень для точной ориентировки антенны.

Полевые работы. Полевые исследования начинают с опытных наблюдений условий регистрации полей различных радиостанций, прослушиваемых в районе, определения режима их работы, а также

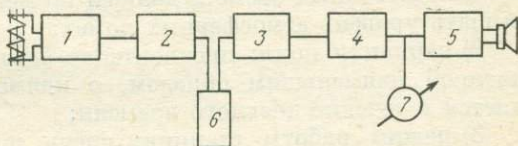


Рис. 225. Блок-схема измерителя ПИНН-2.

1 — входной контур с магнитной антенной; 2 — гетеродин-смеситель; 3 — предварительный усилитель промежуточной частоты; 4 — оконечный усилитель промежуточной частоты; 5 — усилитель низкой частоты и динамик; 6 — декадный делитель напряжения; 7 — выходной стрелочный индикатор.

уровня атмосферных помех. Наблюдения ведут в стационарных условиях, установив прибор на какую-либо устойчивую опору (штатив, стол и т. п.), в течение одного-двух дней с интервалом 10—20 мин. Регистрируют обычно только вертикальную составляющую H_z поля каждой станции, отмечают особенности режима и расписания их работы. Одновременно фиксируют данные об атмосферных помехах. Для определения этих помех лимб частотной настройки устанавливают в положение, при котором не прослушивается ни одна из станций, и снимается отсчет. Результаты опытных наблюдений изображают в виде графиков поведения поля каждой станции во времени, при помощи которых и выбирают рабочую станцию. При этом принимают во внимание:

1) уровень поля; наименьший уровень поля, допустимый для производственных съемок, должен по меньшей мере в 3—4 раза превышать уровень атмосферных помех;

2) вариации поля; предпочтение следует отдавать станции, поле которой наименьшим образом, с наименьшими вариациями изменяется в течение дневного времени;

3) режим работы станции; среди широкоэвещательных станций предпочтительны станции с непрерывным циклом работы, среди коммерческих — те, которые ведут передачу сигналов навигационных систем (радиоимпульсы продолжительностью до 1 с и с интервалами от 1 до 9 с) или осуществляют быструю передачу информации посредством автоматических быстродействующих устройств.

При выборе станции и при подготовке профилей наблюдений учитывают также ориентировку искомым объектов. При вытянутом характере тел (рудные жилы, рудные зоны, контакты) желательно, чтобы простираение их совпадало с направлением (пеленгом) на радиостанцию. Необходимо также принимать во внимание наличие искусственных проводников (трубопроводов, линий электропередач и связи), вызывающих появление искусственных аномалий.

После выбора рабочей станции проводят цикл полевых опытных наблюдений над известными геологическими объектами, характерными для участка съемок, с тем чтобы установить характер аномалий и их связь с элементами геологического разреза и объектами поисков.

При проведении производственных съемок с прибором ПИМП-2 обычно ограничиваются измерениями только вертикальной составляющей H_z . Для измерения H_z магнитную антенну устанавливают вертикально. На аномальных участках определяют также горизонтальную составляющую и угол наклона магнитного вектора к горизонту β . Для измерения горизонтальной составляющей антенну прибора устанавливают в горизонтальное положение, а для определения угла β — поворачивают в положение, при котором отсчет по стрелочному индикатору минимален.

Для записи наблюдений можно использовать журнал метода индукции. При переходе с точки на точку целесообразно, не выключ-

чая прибора, следить за его показаниями. Калибровку прибора проводят обычно через 0,25—2,0 ч работы.

Результаты наблюдений изображают в виде графиков (рис. 226) и карты графиков наблюдаемых величин по профилям. Интерпретацию выполняют на основе тех же положений, которые применяют в методе индукции.

Контакт пород разного сопротивления создает аномалию, аналогичную полю двух параллельных линейных токов противоположного направления, текущих в зоне контакта: кривая H_z имеет один

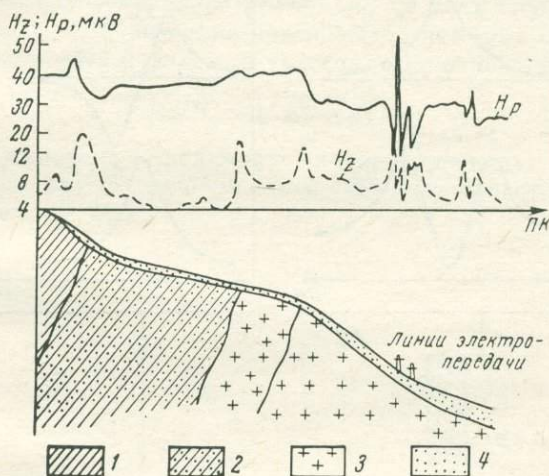


Рис. 226. Графики наблюдений методом радиокипи на Дальнем Востоке (по А. Д. Фролову).

1 — сланцы; 2 — роговики; 3 — граниты; 4 — делювиальные отложения.

максимум, кривая H_p — максимум и минимум (рис. 227, б). Проводящие пласты и жилы оказываются эквивалентными линейному току (рис. 227, а). На результат наблюдений оказывает влияние рельеф дневной поверхности. Понижения местности вызывают появление максимумов на кривой H_z и изгиба кривой H_p .

Максимумы H_z отмечаются также и над средними частями склонов крутизной более 20°.

Радиокомпарационный метод может применяться в процессе поисков хорошо проводящих, неглубоко залегающих рудных тел, а также при геологическом картировании пород на участках, покрытых четвертичными отложениями мощностью до 20 м. Наиболее эффективен метод при расчленении крутопадающих и наклонно-слоистых отложений с достаточно четкой дифференциацией отдельных пластов по электрическим свойствам. Применять метод целесообразно при детальном картировании с шагом наблюдений 10—20 м.

При работе по сверхдлинноволновому варианту метода радиокипи магнитную антенну и усилитель комплекта СДВР-3 закрепляют

на антенном столике, устанавливаемом на штативе. Прибор включают за 30 мин до начала работы на профиле для приведения прибора в стандартный температурный режим. С целью установления постоянства коэффициента усиления прибора и устранения влияния изменений уровня поля, происшедших в течение ночи (межсуточные вариации), ежедневно в начале каждого рабочего дня на контрольном пункте регулятором усиления устанавливают один и тот же отсчет вертикальной составляющей поля.

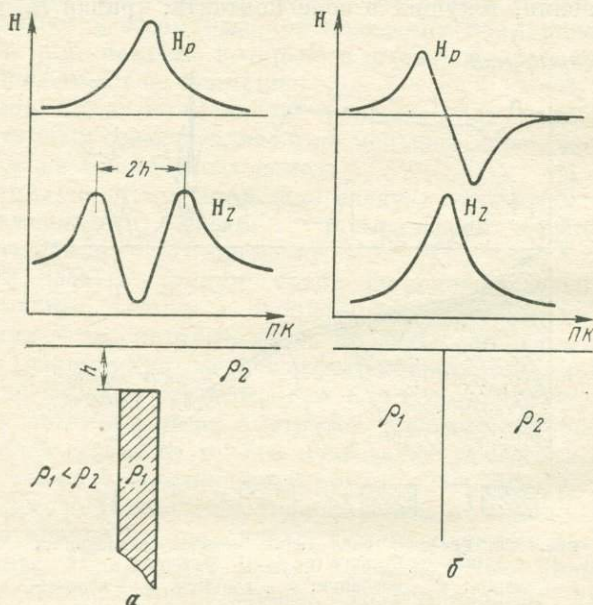


Рис. 227. Типы аномалий радиоволнового поля.
 а — проводящий вертикальный пласт; б — вертикальный контакт.

При наблюдениях на точках съемочной сети рекомендуется проводить измерения вертикальной, горизонтальной составляющих и угла β . Для измерения составляющей H_p плоскость магнитной антенны устанавливают вертикально. Оператор производит настройку на рабочую станцию частотным лимбом и переключателем частоты приемного контура, а затем поворачивает антенну вместе с прибором до максимума отклонения стрелки индикатора и снимает отсчет. Совместив риску антенны с нулевым делением вертикального лимба, измеряет вертикальную составляющую. Для измерения угла β оператор поворачивает магнитную антенну вокруг горизонтальной оси до максимального отсчета по шкале стрелочного индикатора и снимает отсчет угла β по вертикальному лимбу.

Измерения магнитных компонент и угла β целесообразно проводить при поисках и картировании проводящих рудных тел, текто-

нических зон пониженного сопротивления, контактов пород различного сопротивления. При поисках и картировании непроводящих объектов (кварцевых жил, даек и др.) эффективнее измерять электрические составляющие поля в земле. Для этого электрическую антенну в виде отрезка провода длиной 10—20 м (в зависимости от шага наблюдений) заземляют посредством металлических стержней-заземлителей. Провода подключают к гнездам E на пульте прибора. Если заземлители располагают вдоль профиля, то измеряют величину E_x , при расположении заземлителей перпендикулярно к профилю — компоненту E_y .

Однако методически более правильно во всех случаях измерять и магнитные, и электрические компоненты, что позволит более всесторонне исследовать изучаемый участок, а по отношению

$$E_p/H_z = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}/H_z$$

определять импеданс — величину, характеризующую эффективное сопротивление среды, подобно тому, как это делается в магнитотеллурических методах.

Глава XIV

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ¹

§ 1. МЕТОД ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Метод эквипотенциальных линий принадлежит к числу тех способов электроразведки, в которых изучается электрическая составляющая электромагнитного поля заземлений, расположенных на дневной поверхности. В качестве источника такого поля можно использовать электроды любой конструкции и формы (точечные, линейные, сочетание тех и других), питаемые током от какого-либо генератора. Наличие в разрезе исследуемой площади геологических образований, нарушающих однородность среды, является причиной искажения нормального поля заземлений. Наблюдая это поле на дневной поверхности и сравнивая его с нормальным полем, можно сделать заключение о характере геологического разреза в пределах исследуемой площади.

При выборе типа и конструкции электродов руководствуются как соображениями геометрической простоты их нормального поля (что облегчает выделение аномалий, связанных с исследуемыми объектами), так и удобством проведения полевых операций. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяет установка с линейными электродами.

Эквипотенциальные линии поля двух параллельных линейных электродов, расположенных на дневной поверхности, в средней части площади между электродами представляют собой систему прямых, параллельных друг другу и линейным электродам (рис. 228, а).

Наличие вблизи линейных электродов геологических образований, отличающихся по удельному сопротивлению от вмещающих

¹ В этой главе кратко описаны методы электроразведки, широко применявшиеся на предшествующих этапах развития электроразведки, но в настоящее время, в силу изменившихся требований к эффективности электроразведочных работ, совсем или почти вышедшие из употребления. Не исключена возможность, что в дальнейшем совершенствование этих методов на современной теоретической, аппаратурной и методической основе приведет к их широкому применению.

пород, вызывает искажение эквипотенциальных линий. Характер этих искажений покажем на отдельных примерах.

Предположим, что под поверхностью земли на участке между заземлениями расположено тело, сопротивление которого намного больше сопротивления вмещающих пород. Как показано на рис. 228, б, электрический ток, текущий от одного заземления к другому, будет огибать плохо проводящее тело. Поскольку эквипотенциальные линии в изотропной среде перпендикулярны к токовым, то они в рассматриваемом случае будут изгибаться в сторону возмущающего поля объекта, как бы втягиваясь в него. На дневной поверхности описанное искажение нормального поля будет

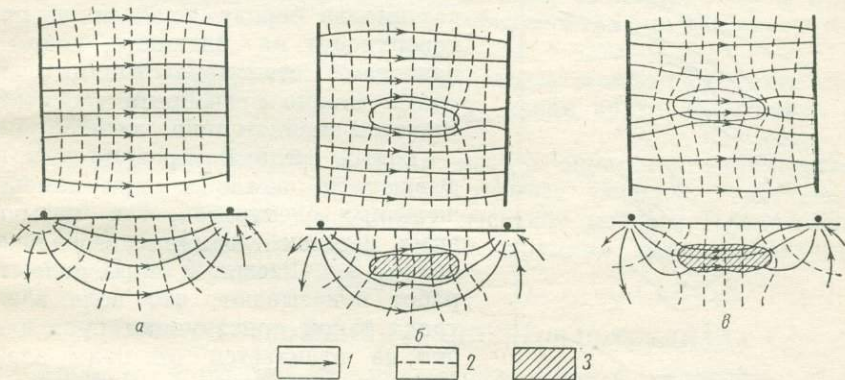


Рис. 228. Электрическое поле линейных электродов.

a — нормальное; *б* — при наличии в разрезе плохо проводящего тела; *в* — при наличии в разрезе хорошо проводящего тела. 1 — токовые линии; 2 — эквипотенциальные линии; 3 — проводящее тело.

наблюдаться в менее четкой форме вследствие сглаживающего влияния вмещающих тело пород, однако принципиально характер искажения поля будет таким же. В том случае, когда среди относительно плохо проводящих пород расположено хорошо проводящее тело (например, линза пирита среди метаморфических сланцев), искажение поля линейных электродов будет носить совсем иной характер. Ток, текущий в земле от одного заземления к другому, будет концентрироваться в хорошо проводящем теле. Соответственно этому токовые линии изогнутся в сторону хорошего проводника, а эквипотенциальные поверхности обогнут проводник у его концов. На дневной поверхности, как это показано на рис. 228, *в*, искажение нормального поля будет наблюдаться в менее четкой форме и выразится в том, что эквипотенциальные линии будут огибать возмущающее тело и сгущаться у его концов. Последнее объясняется тем, что у концов проводящего тела ток, сконцентрировавшийся в нем, вытекает (или втекает) в среду со значительно большим сопротивлением. Падение потенциала между двумя точками среды, как известно, тем больше, чем больше удельное сопротивление и плотность

тока в ней. Таким образом, у концов проводника потенциал изменяется быстрее, чем над проводником или вдали от него.

Комплект аппаратуры для работы методом эквипотенциальных линий включает в себя источник тока, линейные электроды и искательную цепь. В качестве источника тока может быть использован генератор из комплекта ИКС-50.

Линейные электроды, используемые при работе методом эквипотенциальных линий, изготавливаются из голого медного многожильного луженого провода типа антенного канатика. Общее сечение жил 6—10 мм². Сопротивление 1 км такого провода (1—1,5 Ом) достаточно мало по сравнению с падением потенциала между точками дневной поверхности на планшете, поэтому падением потенциала вдоль электрода можно пренебречь и считать электрод эквипотенциальным.

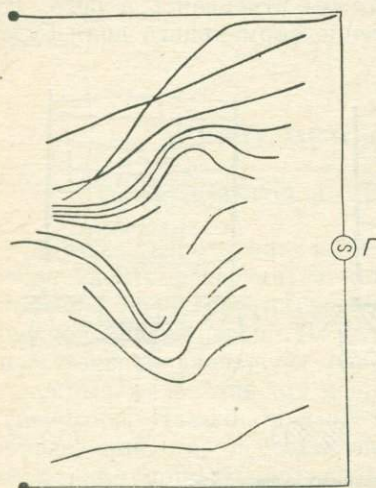


Рис. 229. Карта эквипотенциальных линий над сульфидной рудной залежью.

Г — генератор.

Голый медный провод раскладывают на земле и при помощи железных электродов, так называемых шпилек, заземляют через каждые 4—5 м. Расчет и опыт полевых работ показывают, что поле электрода такой конструкции практически не отличается от поля электрода, заземленного по всей длине.

Общее число шпилек и их длина определяются длиной линейных электродов, а также сопротивлением поверхностного слоя на исследуемом участке. Чем выше это сопротивление, тем больше шпилек требуется для заземления голого провода и тем длиннее должны быть шпильки. Для прослеживания эквипотенциальных линий на местности применяется такая же искательная цепь, как в методе заряда.

Полевые работы методом эквипотенциальных линий начинают с выбора участка работ и подготовки его к съемке. Учет имеющихся данных о геологическом строении участка съемки позволяет обоснованно подойти к выбору размера планшета, и правильно ориентировать линейные электроды.

При поисках хорошо проводящих рудных залежей линейные электроды следует ориентировать перпендикулярно к длинной оси рудного тела. В этом случае оно сильнее скажется на конфигурации изолиний. Расстояние между линейными электродами изменяется от 0,5 до 2 км. Обычно его берут равным (либо несколько меньше) длине электродов.

Электрическое поле линейных электродов изучают путем прослеживания на дневной поверхности и последующей топографиче-

ской съемки эквипотенциальных линий. Результатом такой съемки является карта эквипотенциальных линий, по которой делается заключение о геологическом строении исследуемой площади.

Начальные точки эквипотенциальных линий обычно выбирают на равных расстояниях друг от друга на базисном профиле, перпендикулярном к линейным электродам и отстоящем от края планшета (к центру его) на расстоянии $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ длины электродов. В этой части планшета влияние концов электродов уже мало и поле близко к однородному.

Методика прослеживания изолиний сходна с описанной в гл. VI. Топографическую съемку изолиний выполняют при помощи буссоли и мерной ленты. Для повышения точности съемки рекомендуется на съемочной площади инструментально разбивать сеть опорных профилей.

Результаты полевых работ представляют в виде карт эквипотенциальных линий. В качестве примера такая карта изображена на рис. 229.

Основная область применения метода эквипотенциальных линий — поиски хорошо проводящих рудных залежей, залегающих на глубине не свыше нескольких десятков метров. При помощи этого метода были открыты многие крупные медноколчеданные месторождения Урала и Казахстана.

§ 2. МЕТОД ОТНОШЕНИЯ ГРАДИЕНТОВ ПОТЕНЦИАЛА ¹

Сущность этого метода, являющегося одной из модификаций электрического профилирования с неподвижными питающими заземлениями, заключается в измерении отношения разностей потенциалов (градиентов потенциала) между смежными точками, размещающимися вдоль профилей, в поле точечных или линейных питающих заземлений.

Для измерений применяют установку из пяти заземлений: двух питающих AB и трех измерительных MON (рис. 230); расстояния MO и ON равны между собой.

При каждом положении измерительных заземлений на профиле измеряют отношение разностей потенциалов ΔU_2 между передней парой измерительных заземлений NO и отношение разностей потенциалов ΔU_1 между задней парой — OM . Значение $\Delta U_2/\Delta U_1$ относят к точке стояния среднего заземления O .

Затем установку перемещают вдоль профиля на некоторое расстояние, обычно равное $MN/2$, и измерения повторяют.

Результаты наблюдения изображают в виде графика $\Delta U_2/\Delta U_1$ по профилю: на горизонтальную ось наносят положение точек наблюдения (точек расположения заземления O), по вертикали откладывают значение вычисляемого отношения градиента потенциала.

Для более четкого выявления искомым геологическим объектам измерения ведут в пределах средней части расстояния между

¹ Иногда этот метод неудачно называют методом ИЖ (искатель жил).

питающими заземлениями, где поле более однородно. Очевидно, что в нормальном поле (в однородной среде) плотность тока между заземлениями NO и OM будет одинакова, поэтому одинаковы будут величины ΔU_2 и ΔU_1 , а их отношение будет равно 1. График $\Delta U_2/\Delta U_1$ в этом случае будет представлять прямую линию, параллельную оси абсцисс (рис. 231, а). Поместим в поле заземлений A и B вертикальный пласт высокого сопротивления. Токовые линии будут стремиться обтекать его, и плотность тока вблизи поверхности Земли увеличится. По мере приближения измерительных заземлений к пласту величина ΔU_2 начнет возрастать раньше, чем ΔU_1 (так как заземление N располагается впереди). В результате отношение $\Delta U_2/\Delta U_1$ также начнет расти. Экстремум кривой будет располагаться над левой гранью пласта. Когда заземления MO займут

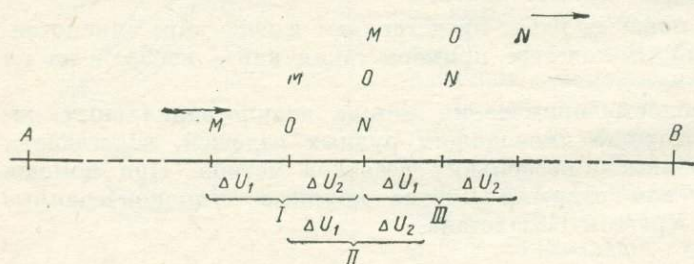


Рис. 230. Схема установки и последовательности измерений методом градиентов потенциала.

Положение электродов: I — при первом замере, II — при втором замере, III — при третьем замере.

симметричное положение над головой пласта, то отношение $\Delta U_2/\Delta U_1$ опять станет равным 1. При дальнейшем передвижении измерительных электродов вправо от пласта плотность тока начнет уменьшаться, что приведет к тому, что отношение $\Delta U_2/\Delta U_1$ станет меньше 1, достигнет минимума и по мере удаления от пласта снова приблизится к 1 (рис. 231, б).

Над хорошо проводящим пластом на графике слева от него наблюдается минимум, а справа — максимум (рис. 231, в). Эти и аналогичные теоретические графики $\Delta U_2/\Delta U_1$ служат основой при интерпретации результатов полевых наблюдений.

Комплект аппаратуры для работ описываемым способом (комплект ИЖ) состоит из генератора и приемника.

Генератором служит виброинвертор, преобразующий постоянный ток от сухих батареек в переменный с частотой 100 Гц.

Приемник представляет собой измерительный мост на активных сопротивлениях, в плечи которого включены измерительные заземления MO и ON . Баланс моста осуществляется индикатором нуля, представляющим собой трехкаскадный усилитель с телефоном и стрелочным индикатором на выходе.

Результаты наблюдений представляют в виде карты графиков $\Delta U_2/\Delta U_1$ (рис. 232). На графиках выделяют аномалии, обусловленные контактами, локальными телами высокого или низкого сопротивления. Ввиду общей сложности графиков многочисленными неоднородностями, для надежного выделения аномалий

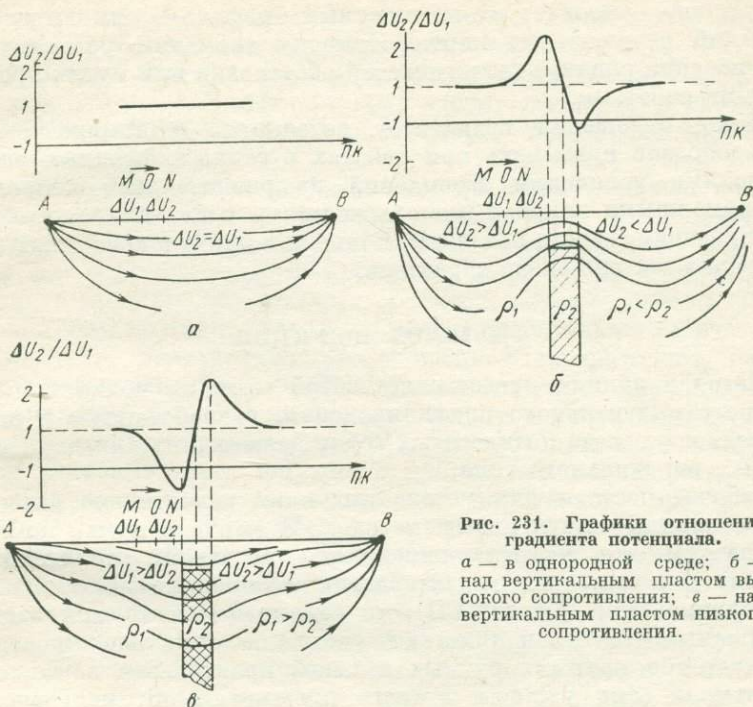
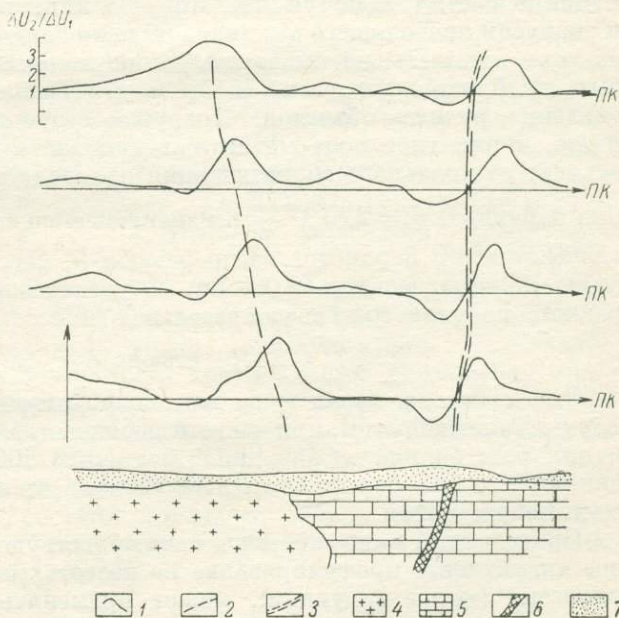


Рис. 231. Графики отношений градиента потенциала.
 а — в однородной среде; б — над вертикальным пластом высокого сопротивления; в — над вертикальным пластом низкого сопротивления.

Рис. 232. Карта графиков $\Delta U_2/\Delta U_1$.

1 — графики $\Delta U_2/\Delta U_1$;
 2 — ось аномалии контакта;
 3 — ось аномалии проводимости;
 4 — границы;
 5 — известняки;
 6 — сульфидная проводящая жила;
 7 — четвертичные отложения.



следует коррелировать их по смежным профилям. Оси выделенных аномалий отмечают на карте. Природу аномалий устанавливают на основании анализа геологической обстановки или путем проверки горными работами.

Метод отношения градиентов потенциала с комплектом ИЖ целесообразно применять при работах в горных, таежных районах с плохими условиями заземлений и сравнительно однородными и маломощными покровными отложениями с целью геологического картирования (дайки, контакты) и поисков плохо проводящих крутопадающих тел жильного характера.

§ 3. МЕТОД ИНДУКЦИИ

Метод индукции представляет собой одну из модификаций дипольного индуктивного профилирования, разработанную и широко применявшуюся до пятидесятих годов нашего столетия для поисков рудных тел жильного типа.

Рабочие частоты для метода индукции значительно выше, чем для остальных индуктивных методов. В выпускавшемся комплекте аппаратуры эти частоты измеряются десятками килогерц. Если обратиться к частотным характеристикам для аномалий от локальных проводников (см. § 1 гл. XII), то оказывается, что при частотах, измеряемых десятками килогерц, аномалии от хорошо проводящих и достаточно крупных рудных залежей практически не зависят от частоты, а сами частоты намного превышают оптимальные. Так, например, если задаться частотой 40 кГц, параметром $pa^2 = 12$ и радиусом проводящего цилиндра 50 м, то для того, чтобы указанная частота являлась оптимальной, сопротивление цилиндра должно быть приблизительно равно 15 Ом·м, что намного превышает сопротивление рудных объектов. С другой стороны, как указывалось выше, нормальное поле магнитных диполей в наибольшей степени зависит от удельного сопротивления однородного полупространства

при параметре $p = 2,81 \sqrt{\frac{t}{\rho}} r$, изменяющемся от 2 до 7. Если среднее значение этого параметра взять равным 5, расстояние между диполями 100 м, а частоту 40 000 Гц, то удельное сопротивление однородного полупространства определится из соотношения

$$2,81 \sqrt{\frac{f}{\rho}} r = 5; \text{ отсюда } \rho \approx 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Эта величина характерна для сопротивления рудовмещающих пород. Таким образом, при частоте, измеряемой десятками килогерц, и при расстояниях между диполями около 100 м поле магнитного диполя в очень большой степени зависит от сопротивления рудовмещающих пород.

Приведенные выше примеры свидетельствуют о том, что дипольное индуктивное профилирование на частоте, измеряемой десятками килогерц (метод индукции), может применяться в основном для решения задач геологического картирования, а также при поисках

руд, обладающих высоким сопротивлением (единицы и десятки ом-метров), либо маломощных рудных тел жильного типа.

Аппаратура для работы методом индукции выпускалась под названием Земля-2¹. В этот комплект входят генератор и приемник. Методика полевых работ методом индукции зависит от характера геологических задач.

В том случае, когда исследования проводят с целью поисков рудных тел жильного типа либо картирования крутопадающих геологических образований повышенной проводимости (тектонических зон, пластов графитизированных пород и др.), причем нет сведений о простирации искомым объектов, полевые работы выполняют способом кругового обхода, в поле горизонтального магнитного диполя, т. е. вертикально расположенной генераторной рамки. Предположим, что в поле такого диполя оказалось крутопадающее пластообразное хорошо проводящее тело с простираем, параллельным плоскости рамки (рис. 233). В проводящем теле индуцируются вихревые токи, текущие в плоскостях, перпендикулярных к первичному полю, т. е. в основном параллельно простираению залежи. Вследствие скин-эффекта, характерного для высоких частот, используемых в методе индукции, вихревые токи концентрируются в краевых частях проводящего тела. Это обстоятельство позволяет при расчете аномального магнитного поля заменить объемные токи в проводящем теле линейными токами, текущими по периметру тела. Следует иметь в виду, что при таких расчетах обычно не учитывают магнитное поле токов, индуцированных в проводящих вмещающих породах. Влияние последних уменьшается с уменьшением электропроводности вмещающих пород.

Если хорошо проводящее тело имеет достаточно большие размеры по простираению и падению (по сравнению с глубиной залегания верхней его кромки), то в первом приближении можно считать, что аномальное поле создается током, совпадающим с верхней кромкой тела. Графики вертикальной и горизонтальной составляющей аномального поля, а также график угла α наклона суммарного вектора магнитного поля к горизонтальной плоскости изображены на рис. 233.

Из приведенного выше следует, что при наличии в разрезе хорошо проводящего крутопадающего пласта или жилы положение этого геологического образования можно ориентировочно определить, измерив на дневной поверхности вертикальную компоненту поля, а также угол α . Измерение горизонтальной компоненты поля принципиально возможно, но невыгодно вследствие того, что в этой компоненте основную роль играет первичное поле рамки, а не поле токов, текущих в проводящем объекте.

Полевые работы способом кругового обхода включают в себя два этапа — поиски и прослеживание электрических осей, а также детализационные исследования.

¹ В настоящее время выпуск этой аппаратуры прекращен.

Поиски и прослеживание электрических осей начинают с топографической подготовки участка. Она заключается в разбивке сети точек, в которых впоследствии будет помещен генератор. Форма и густота геометрической сети точек наблюдения определяются формами и размерами объектов поисков.

Собственно съемочные работы начинают с того, что генератор помещают в какую-либо точку съемочной сети и устанавливают ось

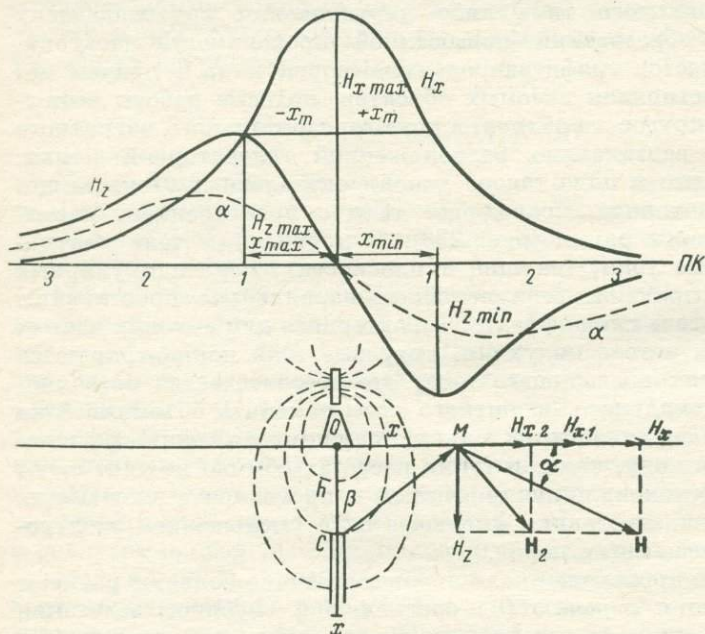


Рис. 233. Проводящее тело в поле горизонтального магнитного диполя.

вращения его рамки по уровню вертикально. Затем рамку подключают к генератору и устанавливают нормальный режим его работы.

Приемную рамку помещают в какую-либо точку, расположенную на расстоянии 40—150 м от генераторной рамки так, чтобы одна из осей вращения была вертикальна, а вторая — горизонтальна. Горизонтальную ось вращения визируют на центр генераторной рамки, а плоскость витков генераторной рамки — на центр приемной. Затем измеряют угол наклона суммарного вектора магнитного поля к горизонту и вертикальную компоненту поля.

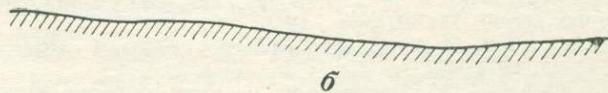
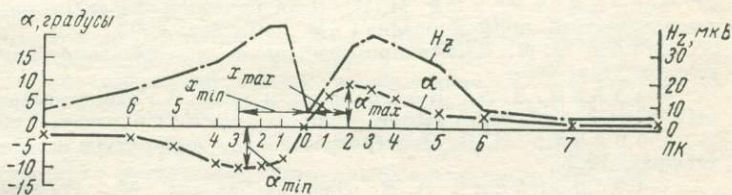
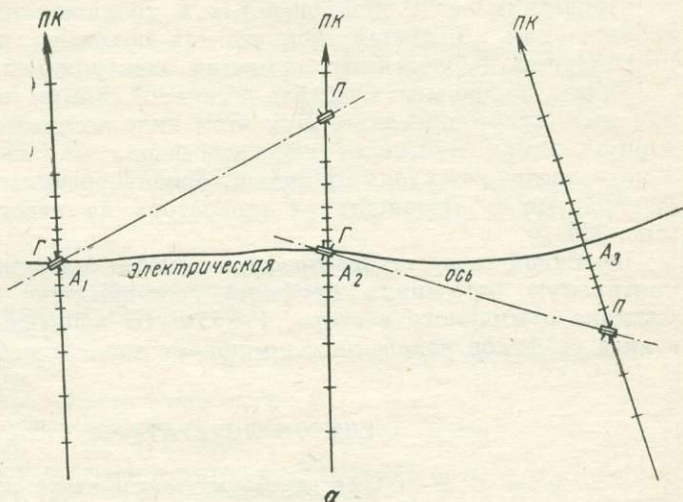
Точки наблюдения угла α и H_z при данном положении генератора располагают на окружности с центром в генераторном диполе и радиусом, равным 40—150 м. Число точек наблюдений на окружности n изменяется в зависимости от глубины и размеров искомых объектов, а также от требуемой детальности исследований.

Положение точек наблюдения при обходе вокруг генератора определяют визуально и на местности не отмечают. Для более равномерного размещения этих точек на окружности после измерения

поля на какой-либо точке генераторную рамку поворачивают на угол, равный $360^\circ/n$, до перехода оператора на следующую точку; таким образом, оператор по ориентировке этой рамки имеет возможность более точно определить положение на местности последующей точки стояния приемной установки. Изменение длины радиуса при обходе генератора по кругу не должно превышать 20%.

Рис. 234. Профилирование электрических осей.

а — расположение точек наблюдений; б — график вертикальной составляющей H_z и кривая обращения углов α ; Г — генератор; П — приемник.



Электрическую ось выделяют по характеру изменения угла α и H_z при обходе вокруг генератора. Если знак меняется таким образом, что слева от точки с нулевым значением он отрицателен, а справа — положителен, то можно сделать заключение о наличии электрической оси. Углы наклона α , не превышающие $\pm 2^\circ$, считаются нормальными. Вертикальная составляющая поля над осью имеет минимум, а по обе стороны от нее — максимумы.

Положение обнаруженной электрической оси отмечают на местности колышками (точки A_1 — A_3 на рис. 234), после чего генера-

тор помещают в одну из этих точек и снова производят обход с приемной рамкой вокруг генератора. Таким образом прослеживают следующие точки электрической оси и т. д.

Результаты поисковых съемок изображают в виде плана расположения электрических осей.

Детальную съемку выполняют с целью уточнения положения электрических осей, обнаруженных в процессе поисковой съемки, а также для выявления природы тех объектов, которые явились источниками наблюдаемых аномалий электромагнитного поля.

Одним из основных способов детальной съемки методом индукции является профилирование. При этом в виде детальных работ генераторную рамку помещают непосредственно на электрической оси а поле исследуют вдоль профилей, ориентированных вкрест прослеженной оси и отстоящих от генератора на расстоянии 50—60 м (рис. 234, а).

В каждой точке такого профиля измеряют вертикальную и горизонтальную (по линии профиля) составляющие поля или угол наклона суммарного вектора. Результаты наблюдений изображают в виде графиков измеренных компонент поля (рис. 234, б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альпин Л. М. Теория дипольных зондирований. М., Гостехиздат, 1950.

Бердичевский М. Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М., «Недра», 1968.

Блох И. М. Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Госгеолтехиздат, 1962.

Ваньян Л. Л., Бобровников Л. З. Электроразведка по методу становления электромагнитного поля. М., Госгеолтехиздат, 1963.

Горячко И. В. Электроразведочная аппаратура и оборудование. М., «Недра», 1968.

Заборовский А. И. Электроразведка. М., Гостехиздат, 1964. Инструкция по электроразведке. Ч. I. Методы постоянного тока. М., Госгеолтехиздат, 1961.

Инструкция по электроразведке Ч. II. Методы переменных электромагнитных полей. М., «Недра», 1966.

Комаров В. А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л., «Недра», 1972.

Пылаев А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М., Госгеолтехиздат, 1968.

Родионов П. Ф. Электроразведка методом заряда. М., «Наука», 1971.

Саковцев Г. П., Редозубов А. А. Методы скважинной электроразведки при поисках и разведке рудных месторождений. М., «Недра», 1968.

Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., «Недра», 1968.

Тархов А. Г. Основы геофизической разведки методом радиокип. М., Госгеолтехиздат, 1961.

Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., «Недра», 1966. Авт.: Б. С. Светов, А. Д. Петровский, Е. М. Ершов и др.

Якубовский Ю. В. Низкочастотные индуктивные методы электроразведки. М., Госгеолтехиздат, 1963.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Введение	3
Г л а в а I. Электрические свойства горных пород	10
§ 1. Удельное электрическое сопротивление	10
§ 2. Диэлектрическая постоянная	18
§ 3. Поляризуемость	18
Г л а в а II. Основные положения теории электроразведки постоянными полями	21
§ 1. Нормальные электрические поля	21
§ 2. Поля точечных источников в неоднородных средах	30
§ 3. Заземления	43
Г л а в а III. Общие сведения о методе сопротивлений	47
§ 1. Кажущееся удельное сопротивление	47
§ 2. Установки для работы методом сопротивлений	49
§ 3. Принцип взаимности	53
§ 4. Аппаратура и оборудование для работы методом сопротивлений	54
§ 5. Утечки тока и меры по их устранению	75
Г л а в а IV. Вертикальное электрическое зондирование	78
§ 1. Сущность метода. Теоретические кривые ВЭЗ и основы теории палеток	78
§ 2. Методика полевых работ	100
§ 3. Интерпретация результатов вертикального электрического зондирования	126
§ 4. Определение удельного сопротивления пород	143
§ 5. Применение метода ВЭЗ	147
Г л а в а V. Электрическое профилирование	151
§ 1. Сущность метода	151
§ 2. Профилирование симметричной установкой АМNB	154
§ 3. Профилирование симметричной установкой АА'МNB'В с двойными разносами	160
§ 4. Профилирование с неподвижными питающими заземлениями (съемка срединных градиентов)	164
§ 5. Комбинированное профилирование	169
§ 6. Дипольное профилирование	173
§ 7. Круговое профилирование (снятие полярных диаграмм ρ_K)	176
§ 8. Интерпретация результатов профилирования	179
Г л а в а VI. Метод заряда	187
§ 1. Сущность метода	187
§ 2. Прослеживание эквипотенциальных линий над заряженным телом	191
§ 3. Измерение градиентов потенциала над заряженным телом	194
§ 4. Измерение магнитного поля над заряженным телом	199

	Стр.
§ 5. Определение направления и скорости движения подземных вод	200
§ 6. Применение метода заряда для корреляции разрезов по буровым скважинам	204
Глава VII. Метод естественного электрического поля	206
§ 1. Сущность метода	206
§ 2. Поля поляризованных тел простейшей геометрической формы	211
§ 3. Аппаратура для съемки естественного поля	215
§ 4. Методика и техника полевых работ	219
§ 5. Обработка и изображение результатов наблюдений	228
§ 6. Основы интерпретации	232
§ 7. Применение метода	235
Глава VIII. Метод вызванных потенциалов	238
§ 1. Сущность метода	238
§ 2. Основные способы измерений вызванной поляризации. Аппаратура	243
§ 3. Методика и техника полевых работ	253
§ 4. Обработка и интерпретация результатов наблюдений	258
§ 5. Применение метода вызванных потенциалов	266
Глава IX. Краткие сведения из теории электроразведки переменными полями	269
§ 1. Понятие о гармонически меняющихся переменных электромагнитных полях	269
§ 2. Понятие о неустановившихся электромагнитных полях	272
§ 3. Способы возбуждения и исследования переменных электромагнитных полей, применяемые в электроразведке	274
§ 4. Нормальные поля	277
Глава X. Методы магнитотеллурического поля	284
§ 1. Общие сведения о магнитотеллурическом поле Земли	284
§ 2. Физические основы методов магнитотеллурического поля	286
§ 3. Магнитотеллурическое зондирование	289
§ 4. Магнитотеллурическое профилирование	290
§ 5. Полевые работы методами магнитотеллурического поля	293
§ 6. Интерпретация результатов полевых наблюдений и применение методов магнитотеллурического поля	296
Глава XI. Частотное электромагнитное зондирование и зондирование становлением электромагнитного поля	301
§ 1. Сущность частотного электромагнитного зондирования	301
§ 2. Аппаратура и методика полевых работ	303
§ 3. Метод зондирования становлением электромагнитного поля	306
Глава XII. Индуктивные методы электроразведки	311
§ 1. Общие сведения об индуктивных методах	311
§ 2. Низкочастотные индуктивные методы	318
§ 3. Метод переходных процессов	329
§ 4. Скважинные модификации индуктивных методов	337
§ 5. Применение индуктивных методов	338
§ 6. Индуктивные методы аэроэлектроразведки	339
Глава XIII. Радиоволновые методы	344
§ 1. Общие положения	344
§ 2. Метод радиоволнового просвечивания	346
§ 3. Метод радиокип	356
Глава XIV. Другие методы электроразведки	364
§ 1. Метод эквипотенциальных линий	364
§ 2. Метод отношения градиентов потенциала	367
§ 3. Метод индукции	370
Список литературы	374

Эр.00к.

3146

НЕДРА - 1974