

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»



А. А. Редозубов

СПЕЦИАЛЬНЫЙ КУРС ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Утверждено Редакционно-издательским советом
Уральского государственного горного университета
в качестве учебного пособия

Екатеринбург, 2010

**Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Уральский государственный горный
университет»**

А. А. Редозубов

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ КУРС
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ**

Учебное пособие

Екатеринбург, 2010

УДК 550.837 (075)

Р33

Рецензенты: А. М. Виноградов, ведущий научный сотрудник Института геофизики УрО РАН, д-р геол.-мин.наук; лаб. электрометрии Института геофизики УрО РАН, зав. каф. А. Н. Ратушняк, канд. техн. наук.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Редозубов А. А.

Р33

Специальный курс электроразведки: учебное пособие / А. А. Редозубов; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 416 с.

Изложены вопросы, не рассматривавшиеся в общем курсе электроразведки или рассматривавшиеся недостаточно подробно. Пособие составлено на основе курса лекций, читаемого автором для студентов специализации «Рудная геофизика» специальности 130201 «Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых».

Может быть полезным аспирантам и работникам производственных и научных организаций, занимающимся электроразведкой.

Рис. 200, библи. 40 наим.

УДК 550.837 (075)

ВВЕДЕНИЕ

Специальным курсом завершается изучение студентами специализации рудная геофизика одной из основных профессиональных дисциплин – электроразведки. В УГГУ этот курс разрабатывался автором и читался с небольшим перерывом с 1978 г. по настоящее время. Кроме автора в отдельные годы курс читался доцентом С. С. Сысковым, также внесшим значительный вклад в его разработку. Взяться за работу над пособием автора побудило отсутствие учебной литературы по спецкурсу.

Предлагаемое пособие представляет собой расширенный курс лекций, читаемый автором студентам указанной специализации на последнем семестре теоретического обучения. В нем излагается ряд вопросов, не рассматривавшихся в общем курсе электроразведки, а также более полно рассматриваются вопросы, излагавшиеся ранее недостаточно подробно.

Значительный объем посвящен изложению вопросов, разрабатывавшихся на кафедре геофизики УГГУ, опубликованных в виде небольших статей в изданиях, многие из которых стали библиографической редкостью. Это касается таких разделов, как электроразведка анизотропных сред, геоэлектрические ореолы колчеданных месторождений, компенсационные методы электроразведки, влияние и учет геоэлектрических помех.

В пособии приведено достаточно большое количество практических примеров, сопровождающихся необходимыми комментариями.

Автор надеется, что книга будет полезна не только студентам-геофизикам, обучающимся по рудной специализации, но также аспирантам и работникам производственных и научных организаций.

1. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1.1. Геоэлектрическая модель, её содержание

С самого начала применения геофизических методов при оценке возможностей применения того или иного метода для решения поставленной задачи и при интерпретации полученных результатов сознательно или подсознательно использовалось моделирование. Модель – это упрощенное, усредненное представление реального геологического объекта, сохраняющее основные его черты. Геоэлектрическая модель должна отражать соотношение между электрическими свойствами объекта и вмещающей среды, форму и размеры объекта, его положение относительно плоскости или профиля наблюдений. Часто используемое понятие "возмущающий объект" или "аномалиеобразующий объект" – это не что иное, как частная модель, т. е. модель конкретного объекта.

Даже однотипные геологические объекты различаются между собой. Они могут иметь различные размеры, форму, глубину и элементы залегания. В значительной степени могут различаться электрические свойства объектов и вмещающей среды. Поэтому различаются и частные модели этих объектов.

При анализе возможностей различных методов, расчете ожидаемых аномалий, выборе метода или комплекса методов и методики работ удобнее пользоваться обобщенной моделью, которая включает общие для объектов рассматриваемого типа признаки. Для построения такой модели используются усредненные параметры, получаемые при статистической обработке данных для известных объектов этого типа или пределы возможных изменений параметров. Хотя современные компьютеры позволяют решать задачи расчета полей над достаточно сложными разрезами, надо стремиться, чтобы модель была максимально простой. Усложнение модели целесообразно лишь при интерпретации конкретной аномалии, с учетом всех имею-

щихся сведений о возмущающем объекте. Кроме геоэлектрического разреза, аппроксимирующего возмущающий объект и вмещающую среду, модель должна отражать вид наблюдаемых над объектом аномалий и характер физических полей над вмещающими породами.

Для примера рассмотрим модель колчеданного месторождения, приуроченного к крутопадающей рудовмещающей структуре. Примером таких месторождений могут служить многие колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения на Урале, Рудном Алтае и в других регионах. Если отвлечься от деталей, можно представить такое месторождение в следующем виде (рис. 1.1, *з*). Вмещающими породами являются эффузивно-осадочные образования, имеющие удельное сопротивление $\rho = n \cdot 10^3$ Ом·м и поляризуемость $\eta \approx 2$ %. Непосредственно вмещающими породами являются метасоматиты кварцевохлоритосерицитового состава, залегающие в виде крутопадающего пласта мощностью несколько сот метров. Их удельное сопротивление $n \cdot 10^2$ Ом·м, иногда $n \cdot 10^1$ Ом·м. Поляризуемость, в зависимости от содержания вкрапленности сульфидов, может колебаться от 4-5 % до 15-20 %. Рудные тела имеют изометричную или линзовидную форму. В первом случае их радиус может быть от нескольких десятков до первых сотен метров. Во втором случае большая ось имеет длину от нескольких десятков метров до километра, малая ось (мощность) – от единиц до нескольких десятков, редко до первых сотен метров. Удельное сопротивление рудной массы обычно $n \cdot 10^{-1}$ Ом·м, коэффициент поверхностной поляризации $n \cdot 10^{-1}$ м. Если руда не сливная и по структуре приближается к прожилково-вкрапленной, она поляризуется объемно и в этом случае ее поляризуемость достигает 30-50 %.

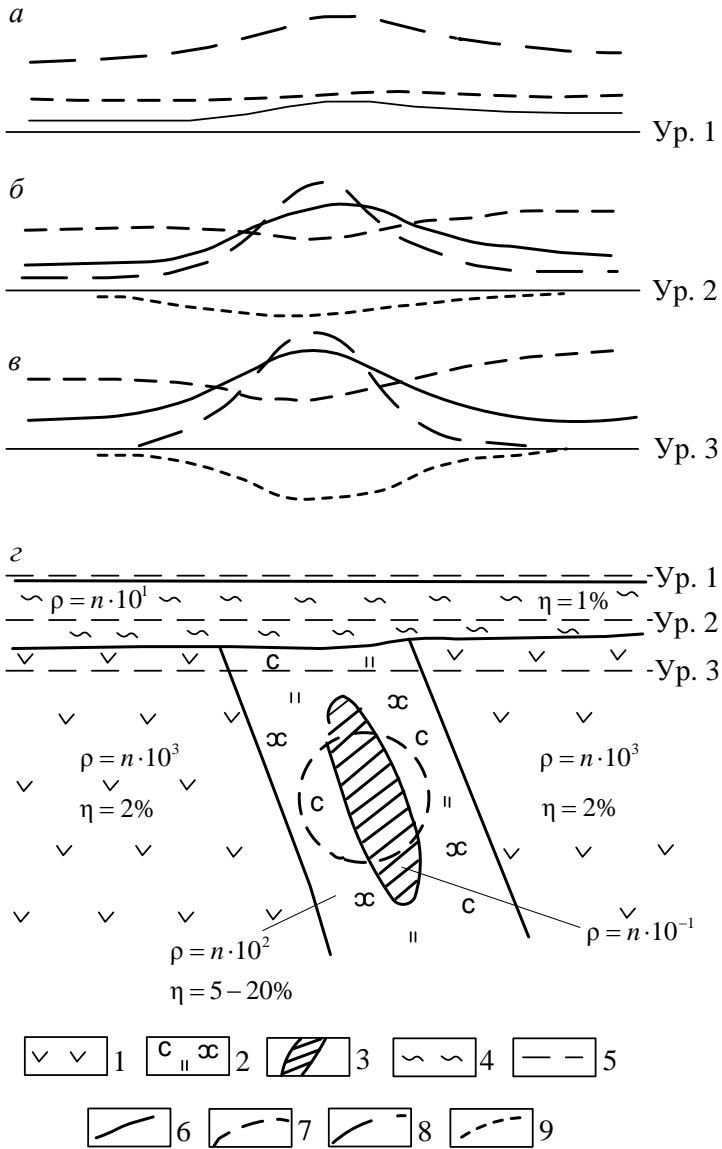


Рис. 1.1. Геоэлектрическая модель колчеданного месторождения: 1 – эффузивно-осадочные породы; 2 – метасоматиты; 3 – колчеданные руды; 4 – покровные отложения; 5 – уровни эрозионного среза; 6 – графики η_{κ} ; 7 – графики ρ_{κ} ; 8 – графики E/I МПП; 9 – графики потенциала естественного поля

У поверхности земли залегает слой рыхлых образований мощностью от единиц до первых сотен метров. Его удельное сопротивление может меняться от $n \cdot 10^0$ до $n \cdot 10^2$ Ом·м. Поляризуемость рыхлых отложений $n \cdot 10^{-1}$ -1 %. Между рыхлыми отложениями и свежими породами обычно развита кора выветривания с удельным сопротивлением $n \cdot 10^1$ - $n \cdot 10^2$ Ом·м и поляризуемостью 1-2 %. Мощность коры выветривания обычно несколько десятков метров. В модели часто бывает можно объединить рыхлые отложения и кору выветривания в один эквивалентный слой. При этом мощность следует сохранять равной суммарной мощности объединяемых слоев, а удельное сопротивление принимать таким, чтобы продольная проводимость $S_{\text{эКВ}}$ была равна сумме продольных проводимостей слоев S_1 и S_2 , т. е.

$$S_{\text{эКВ}} = \frac{h_1 + h_2}{\rho_{\text{эКВ}}} = S_1 + S_2 = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}; \quad (1.1)$$

$$\rho_{\text{эКВ}} = \frac{h_1 + h_2}{S_1 + S_2}, \quad (1.2)$$

где h_1 и ρ_1 – мощность и удельное сопротивление рыхлых отложений; h_2 и ρ_2 – мощность и удельное сопротивление коры выветривания.

Поляризуемость эквивалентного слоя логично принять равной средневзвешенной поляризуемости объединяемых слоев.

Проявление объекта в различных методах электроразведки зависит от уровня эрозионного среза. Рассмотрим характер аномалий при трех уровнях.

Уровень 1. Район закрытый, т. е. коренные породы перекрыты мощным слоем хорошо проводящих покровных отложений. В этом случае можно ожидать, что минерализованная зона метасоматитов при достаточно больших размерах установки проявится слабой аномалией η_k . По ρ_k она едва ли выявится. В методе переходных процессов будет наблюдаться аномалия не-

большой интенсивности от рудного тела на фоне сильного влияния покровных отложений (см. рис. 1.1, *а*). Для более уверенного выделения аномалий, которые могут представлять наибольший интерес, в таких условиях целесообразно проводить работы методами ВП и МПП в варианте зондирования.

Уровень 2. Район полузакрытый, т. е. мощность рыхлых отложений умеренная – несколько десятков метров. В этом случае над зоной метасоматитов можно ожидать появления достаточно интенсивной аномалии η_k . Возможно также появление аномалии ρ_k небольшой амплитуды. Рудное тело должно выделяться четкой аномалией в методе переходных процессов. При благоприятных условиях возможно появление слабой аномалии в методе естественного поля (см. рис. 1.1, *б*).

Уровень 3. Район открытый, мощность покровных образований незначительна. Над рудовмещающими метасоматитами будет наблюдаться интенсивная аномалия η_k . Здесь же вероятна аномалия электропроводности. Рудное тело будет выявляться четкой аномалией в МПП при слабом влиянии верхнего слоя. Вероятна также аномалия в методе естественного поля (см. рис. 1.1, *в*).

Модель колчеданного месторождения, приуроченного к зоне расланцевания, как это имеет место на Среднем Урале и в ряде других регионов, отличается от рассмотренной только значительной анизотропией рудовмещающих метасоматитов. Анизотропия оказывает влияние на аномалии электропроводности и вызванной поляризации. В то же время ее изучение может помогать решению некоторых задач. Эти вопросы будут рассмотрены в одном из следующих разделов. Если крутопадающие рудные тела имеют небольшую мощность, применение МПП обычно не эффективно.

При оценке возможностей методов электроразведки, выборе методики работ и интерпретации результатов кроме модели объекта поисков полезно иметь и модели возможных объектов, являющихся причинами геоэлектрических помех. Например, участки с повышенной мощностью рыхлых отложений и

зоны тектонических нарушений могут вызывать аномалии в МПП и в методах сопротивлений. Графитизированные породы вызывают аномалии поляризуемости и электропроводности во всех методах. Аномалии поляризуемости могут быть связаны с участками рассеянной сульфидной вкрапленности, не имеющей отношения к рудообразованию. Подобные объекты могут быть отражены не в модели месторождения, а в модели рудного поля или района, или иметь самостоятельное значение.

Для оценки ожидаемых аномалий путем математического моделирования надо задавать различные параметры модели в пределах их возможных изменений. Если анализируется конкретный участок, для которого колебания параметров относительно небольшие, может быть сформирована частная модель, для которой задаются конкретные значения параметров, а не пределы их изменений. Такая модель называется детерминированной.

1.2. Исходные данные для формирования геоэлектрической модели

Исходными данными для формирования геоэлектрической модели служат сведения о геометрических параметрах моделируемого объекта и об электрических свойствах объекта и вмещающих пород. К геометрическим параметрам относятся форма и размеры объекта, глубина залегания, угол падения и т. п. Если объект приурочен к каким-то геологическим образованиям, таким, как тектонические зоны, области измененных пород и т. п., необходимы данные о геометрических параметрах и свойствах этих геологических тел и структур.

Источником сведений о геометрических параметрах формируемой модели являются геологические представления об объекте поисков, параметры известных подобных объектов в данном регионе и в других регионах с аналогичным геологическим строением. При формировании обобщенной модели задают пределы возможных изменений параметров или определяют

их среднестатистическое значение. При этом учитывают и экономические факторы, такие, как минимальный размер объекта, представляющего практический интерес, минимальное соотношение между размером объекта и глубиной его залегания и т. д.

Сведения об электрических свойствах горных пород и полезных ископаемых могут быть получены путем измерений на образцах, по данным каротажа или с помощью параметрических измерений. Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки.

Если электрические свойства определяются путем измерений на образцах, надо учитывать, что при этом определяются параметры малого объема. Так как горные породы, особенно в рудных районах, достаточно неоднородны, измерения должны быть массовыми, по крайней мере, на нескольких десятках образцов для каждой породы. При этом на каждом образце должны выполняться несколько измерений на разных его гранях. Надо также иметь в виду, что при измерениях на образцах не учитывается влияние макроструктуры горных пород, хотя в некоторых случаях его можно учесть путем специальной обработки результатов измерений.

Для исследований лучше всего использовать свежие образцы керна скважин. Долго хранившиеся образцы подвергаются изменениям, приводящим к увеличению пористости, в результате чего их удельное сопротивление уменьшается. Поляризуемость также может измениться из-за окисления имеющих в породе рудных минералов. Осторожно следует относиться к результатам измерений на образцах, отобранных из обнажений. Полученные таким образом данные обычно характеризуют не свежие, а выветрелые горные породы.

Способы, в которых требуется придание образцам определенной формы, для массовых измерений мало пригодны из-за трудоемкости подготовки образцов. Часто для определения удельного сопротивления образцов используют четырехточечную установку (рис. 1.2, *a*). Во избежание сильного влияния краев образца он должен быть, по крайней мере, вдвое больше

размера установки. Очень важно, чтобы измерительный прибор имел высокое входное сопротивление, превышающее сопротивление приемной линии MN не менее чем в 10 раз. При этом условии погрешность измерения ΔU не превышает 10 %. При отсутствии измерителя с достаточно высоким входным сопротивлением можно выполнять измерения способом сравнения.

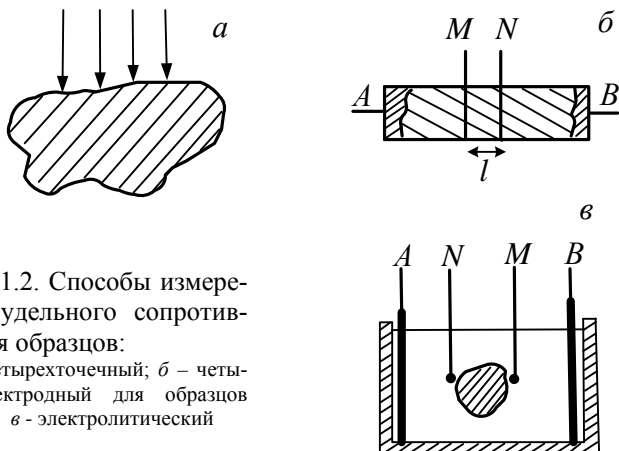


Рис. 1.2. Способы измерения удельного сопротивления образцов:

a – четырехточечный; b – четырехэлектродный для образцов керна; c – электролитический

Если изучаются образцы керна, имеющие длину порядка 10 см и более, удобно использовать установку, показанную на рис. 1.2, b . Питающие электроды, изготовленные из пропитанного раствором медного купороса или поваренной соли, поролон или другого пористого материала, должны контактировать со всей поверхностью торцов образца. В этом случае электрическое поле внутри образца практически однородно. Приемные электроды удобно сделать в виде пружинных колец, также обмотанных пропитанным электролитом пористым материалом. Удельное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{S}{l} \cdot \frac{\Delta U}{I} = \frac{\pi d^2}{4l} \cdot \frac{\Delta U}{I}, \quad (1.3)$$

где S – площадь торца образца; d – диаметр образца.

Можно также использовать электролитический способ. Идея этого способа была предложена Г. П. Саковцевым в 50-х годах прошлого столетия. До практического применения он был доведен А. А. Кокшаровым в 80-х годах. В этом методе образец грубо изометричной формы помещается в раствор с удельным сопротивлением ρ_{01} . Раствор наливается в бачок, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда. В растворе создается однородное электрическое поле с помощью пластинчатых электродов A и B , полностью перекрывающих всю площадь торцевых стенок бачка. Измеряется аномальная составляющая потенциала U_a или разности потенциалов ΔU_a . В первом случае измеряется потенциал электрода M , расположенного у поверхности образца, относительно электрода N , расположенного посередине между питающими электродами. Во втором случае электроды M и N располагаются на противоположных сторонах образца (см. рис. 1.2, *в*). Аномальная компонента измеряемой величины определяется как разность между результатами измерений в присутствии образца и после его удаления. Затем образец помещается в другой бачок, идентичный первому, но заполненный раствором с удельным сопротивлением ρ_{02} и повторяются такие же измерения.

Аномалия от изометричного объекта в однородном электрическом поле пропорциональна коэффициенту $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2}$, где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления вмещающей среды и объекта соответственно. Отсюда отношение результатов измерений аномальной компоненты в первом и во втором растворах:

$$\frac{U_{2a}}{U_{1a}} = \frac{\Delta U_{2a}}{\Delta U_{1a}} = \frac{1 - \rho_{\text{обр}}/\rho_{02}}{1 + 2\rho_{\text{обр}}/\rho_{02}} \cdot \frac{1 + 2\rho_{\text{обр}}/\rho_{01}}{1 - \rho_{\text{обр}}/\rho_{01}}. \quad (1.4)$$

Решив это уравнение относительно $\rho_{\text{обр}}$, найдем удельное сопротивление изучаемой горной породы.

Ориентируя образец в электрическом поле по-разному, можно изучать его анизотропию.

Для выполнения измерений электролитическим способом образцу достаточно придать грубо изометричную форму с помощью молотка. Для получения надежных результатов надо, чтобы удельное сопротивление более высокоомного раствора было в несколько раз больше удельного сопротивления образца. Это вызывает определенные трудности при изучении горных пород с высоким удельным сопротивлением.

Для измерения поляризуемости можно использовать четырехэлектродную установку с питающими электродами, расположенными на торцах образца. Для уменьшения сопротивления питающей линии между металлическими электродами и образцом помещают влажную прокладку из поролона. Приемные электроды должны быть неполяризуемыми (рис. 1.3).

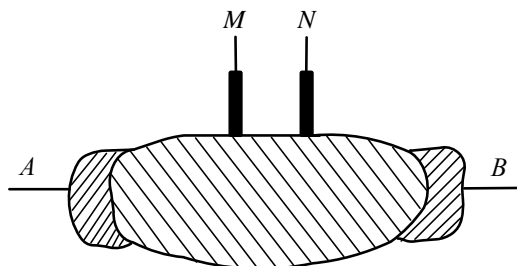


Рис. 1.3. Измерение поляризуемости образцов

Перед измерениями образцы должны замачиваться на несколько суток. При изучении плотных малопористых пород (коэффициент открытой пористости до первых единиц процентов) образцы можно замачивать в водопроводной, колодезной или речной воде с удельным сопротивлением несколько десятков Ом·метров. В порах таких пород концентрация солей обычно достаточно велика, а при замачивании соли не вымываются. Поэтому при замачивании восстанавливается близкая к естественной минерализация поровой воды. Если известно, что минерализация поровой воды низкая, для замачивания надо брать

воду с высоким удельным сопротивлением (техническую дистиллированную, дождевую, снеговую). При изучении пород с высокой пористостью образцы надо замачивать в воде с удельным сопротивлением, близким к удельному сопротивлению подземных вод в этом районе.

Изучение удельного сопротивления горных пород с помощью каротажа наиболее производительно. Но в этом случае измеряется не истинное, а кажущееся удельное сопротивление. Поэтому, чтобы ρ_k не сильно отличалось от ρ необходим зонд определенных размеров. Достоверные сведения об удельном сопротивлении пород дает БКЗ, но оно трудоемко и возможно только когда можно выделить достаточно мощные однородные по ρ пласты.

Ю. М. Гуревичем в 50-х годах был выполнен большой объем исследований по сопоставлению результатов каротажа КС и БКЗ на рудных месторождениях Урала. По его данным наилучшие результаты при применявшихся в то время диаметрах скважин (обычно 76-100 мм) давал двухметровый градиент-зонд [9]. Но по мере увеличения ρ расхождения между КС и БКЗ увеличивались и при $\rho > 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; данные КС отличаются от данных БКЗ в полтора-два раза и более.

При работе в анизотропных породах может оказывать влияние соотношение размера зонда и мощности анизотропного пласта, а также угол встречи пласта скважиной. В зависимости от этого ρ_k может изменяться в λ^2 раз (λ - коэффициент анизотропии).

Надо также иметь в виду, что в настоящее время при бурении скважин часто используются специальные составы, которые оседают на стенках скважин и резко (иногда во много раз) искажают измеряемое при каротаже ρ_k . Так как разные породы имеют разную поглощающую способность, они пропитываются этими добавками на разную глубину, что может привести даже к получению обратного соотношения между сопротивлениями пластов. Такая картина наблюдается, например, в ряде скважин на Чусовском колчеданном месторождении (Полевской район).

Наиболее достоверную информацию дают результаты параметрических измерений в естественных условиях. Но и в этом случае надо учитывать возможные источники искажений результатов. Если есть обнажения интересующих горных пород, следует выполнять измерения на них. Но в верхней части породы подверглись выветриванию. Поэтому измерения лучше выполнять в варианте зондирования, чтобы можно было раздельно определить ρ и η выветрелых и свежих пород. При этом размеры обнажения должны, по крайней мере, вдвое превышать размер установки. Можно выполнять такие измерения и на участках, перекрытых рыхлыми отложениями небольшой мощности с последующей интерпретацией полученных кривых зондирования.

В горных выработках, пройденных недавно, горные породы еще не подверглись значительному выветриванию, поэтому можно выполнять измерения с одним размером установки 1-2 м. Установку следует располагать на достаточно большом удалении от шахтных коммуникаций, чтобы они не искажали результаты измерений.

Изучение анизотропии надо выполнять в естественных условиях с установками достаточно больших размеров. Это связано с тем, что в величину коэффициента анизотропии обычно значительный вклад вносит макроанизотропия. Лучше всего для этого использовать результаты измерений по методу заряда, которые позволяют изучать объемную анизотропию. Круговое профилирование или прослеживание изолинии потенциала в поле точечного источника, расположенного на поверхности земли, позволяют определить только анизотропию в плоскости земной поверхности. Имея данные об угле падения, его влияние можно учесть. Но сложно учесть влияние рыхлых отложений, а параметры трехосной анизотропии оценить невозможно.

Часто бывает, что несколько видов горных пород обладают близкими электрическими свойствами и не различаются при электроразведочных измерениях. Такие породы при построении геоэлектрической модели объединяют. Совокупность

этих пород, образующих квазиоднородные блоки, называют структурно-вещественными комплексами (СВК). Иногда, напротив, в одной горной породе выделяются разности, существенно отличающиеся по электрическим свойствам. В этом случае их следует относить к разным СВК.

В рассмотренном выше примере геоэлектрической модели колчеданного месторождения кроме рудного тела можно выделить три СВК: слагающие участок эффузивно-осадочные породы, рудовмещающие метасоматиты и покровные отложения, включающие рыхлые приповерхностные образования и кору выветривания.

Сведения о форме, размерах и элементах залегания СВК получают из имеющихся геологических данных об участке или об участках с аналогичным геологическим строением

1.3. Обработка результатов измерений электрических свойств горных пород

Электрические свойства горных пород зависят от многих факторов. Поэтому они обычно значительно колеблются в пределах одной и той же породы. В таких условиях отдельное измерение дает случайный результат, который может существенно отличаться от эффективного значения изучаемого параметра, определяющего поведение электрического поля. Чтобы более объективно охарактеризовать свойства горных пород, выполняют статистическую обработку достаточно большого количества измерений. Для этого можно вычислять средние значения, строить гистограммы, кривые распределения вероятности (вариационные кривые) или диаграммы.

При статистической обработке важно правильно выбрать закон распределения изучаемого параметра. Как показывает опыт, для удельного сопротивления лучше подходит логнормальный закон распределения, а для диэлектрической проницаемости – нормальный. О законе распределения поляризуемос-

ти нет единого мнения. Гистограммы η лучше строить также исходя из логнормального закона, чтобы исключить длинный "хвост" со стороны больших значений параметра, а при вычислении среднего эффективная величина параметра обычно лучше характеризуется средним арифметическим его значением.

При построении гистограммы важно правильно выбрать количество интервалов. Для этого обычно пользуются формулой Стерджесса:

$$n = 1 + 3,32 \lg N, \quad (1.5)$$

где n - количество интервалов; N - количество определений. Если обрабатываются результаты измерений на образцах или результаты параметрических измерений, что принимать за одно, определение очевидно. Сложнее обстоит дело с обработкой результатов каротажа. По-видимому, логично за одно определение принимать среднюю мощность элементарного пропластка, для которого определяется значение параметра.

По гистограмме модальное значение изучаемого параметра определяется как координата центра среднего столбца. Если гистограмма не симметрична относительно этого столбца, мода оценивается по соотношению высот столбцов, расположенных слева и справа от среднего. Более строго мода оценивается способом параболы. В этом способе середины вершин трех средних столбцов принимаются за точки параболы, и методами аналитической геометрии определяется положение ее вершины. Модальное значение рассчитывается по формуле:

$$M_o = b + \Delta x \frac{n_2 - n_1}{2n_2 - n_1 - n_3}. \quad (1.6)$$

Значение входящих в формулу символов ясно из рис. 1.4. Построив гистограмму, можно построить вариационную кривую, соединив середины вершин столбцов, как показано на рисунке.

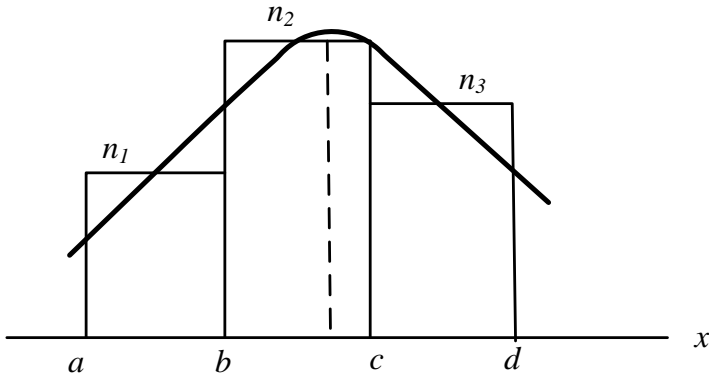


Рис. 1.4. К определению моды распределения способом параболы

Кроме модального значения определяется стандарт, т. е. среднее квадратичное отклонение измеряемой величины от моды

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \text{Mo})^2}{N}}. \quad (1.7)$$

где x_i - измеренные значения; Mo – мода; N – количество определений. Если вычисления выполняются вручную, можно определить стандарт по гистограмме. В этом случае вместо отдельных значений используют средние значения интервалов с учетом весовых коэффициентов

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i (x_i - \text{Mo})^2}{\sum_{i=1}^n p_i}}, \quad (1.8)$$

где p_i – доля интервала со средним значением x_i ; n – количество интервалов.

По вариационной кривой можно оценить стандарт еще более простым способом. В случае нормального распределения точка кривой, расположенная на уровне 0,6 максимального значения, смещена от моды на расстояние стандарта.

Стандарт характеризует степень разброса значений. В интервале $Mo - \sigma \leq x \leq Mo + \sigma$ при нормальном распределении сосредоточено 68 % всех значений, в интервале $Mo - 2\sigma \leq x \leq Mo + 2\sigma$ располагается 96,6 % значений. Если моды двух распределений различаются больше, чем на сумму стандартов, можно полагать, что характеризующиеся этими распределениями породы существенно различаются по изучаемому параметру. В противном случае возможность разделения этих пород надо оценивать в каждом конкретном случае.

Часто на кривой распределения наблюдаются осложнения в виде коленообразных изгибов, или реже – кривая имеет более одного максимума. Это свидетельствует о неоднородности выборки, т. е. о смешении пород, различающихся по своим параметрам. В этом случае можно выполнить декомпозицию кривой распределения, разделив ее на несколько нормальных распределений. Затем, проанализировав породы, попавшие в разные группы, можно установить причины различия их свойств.

Декомпозицию можно выполнять вручную или компьютерным способом по соответствующим программам (в частности, комплект таких программ составлен в УГГУ В. А. Серковым). Принцип декомпозиции сводится к следующему. Выбирают ветвь кривой распределения, которую можно полагать неискаженной и определяют моду частного распределения, которому принадлежит эта ветвь. Можно подправить эту ветвь, оценив стандарт частного распределения как 0,6 его амплитуды, а затем рассчитав частоты в нескольких точках. После этого строят другую ветвь распределения симметрично относительно моды. Вычитая из общего распределения первое частное, строят кривую разности, которая соответствует второму распределению или нескольким другим частным распределениям.

Сумма выделенных частных распределений, подчиняющихся нормальному закону, должна соответствовать общему распределению. Если это равенство не выполняется, разность между суммой частных распределений и исходным распределением характеризует точность декомпозиции. Характеристикой надежности декомпозиции является также соотношение стандартов выделенных частных распределений. Выделение распределений можно считать надежным, если их стандарты не перекрываются. В противном случае декомпозиция может вызывать сомнения. Тогда можно попытаться увеличить ширину интервалов, после чего, возможно, останется одно распределение, близкое к нормальному.

Пример декомпозиции бимодального распределения удельного сопротивления метасоматитов Озерного колчеданного месторождения приведен на рис. 1.5.

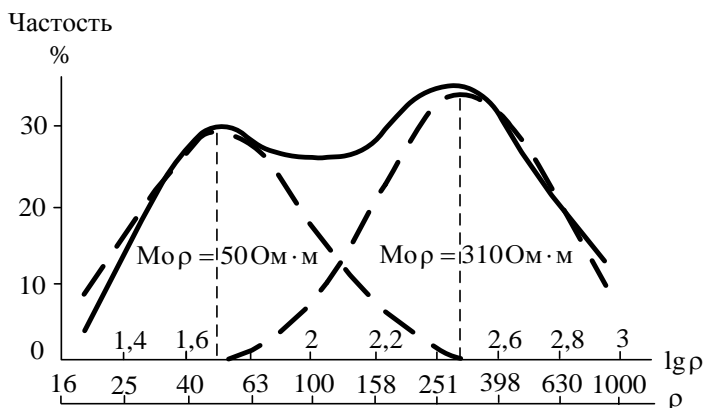


Рис. 1.5. Пример декомпозиции бимодального распределения. Кривые распределения ρ метасоматитов Озерного колчеданного месторождения (Южный Урал)

Четко выделяющиеся частные распределения имеют моды 50 Ом·м и 310 Ом·м. Доли этих распределений в общей выборке составляют 45 % и 55 % соответственно. Анализ показы-

вает, что большинство образцов, относящихся к первому распределению, отобраны из скважин, расположенных в непосредственной близости от рудного тела, а образцы из распределения с более высоким значением моды взяты из скважин, удаленных от оруденения. Так, в скважине 412, пробуренной рядом с рудным телом, 80 % образцов относится к низкоомному распределению, а в скважине 509, расположенной на расстоянии 800 м, 92 % образцов попадает в распределение с высокими значениями ρ .

В рудных районах для одной и той же горной породы достаточно часто наблюдаются незакономерные колебания параметров, значения которых существенно различаются даже в близко расположенных точках. В этом случае, очевидно, выделение частных распределений не позволяет выделить блоки, различающиеся по физическим свойствам. В такой ситуации имеет смысл для характеристики горных пород вычислять средние значения их физических параметров. Так как для удельного сопротивления принимается логнормальный закон распределения, следует вычислять среднее значение $\lg\rho$, а затем переходить к натуральному значению удельного сопротивления.

Менее трудоемко вычисление средневзвешенного значения $\lg\rho$ с помощью гистограммы:

$$(\lg\rho)_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \lg\rho_{\text{cpi}}}{\sum_{i=1}^n p_i}, \quad (1.9)$$

где $\lg\rho_{\text{cpi}}$ – среднее значение $\lg\rho$ для i -го интервала; p_i – доля i -го интервала в выборке; n – количество интервалов.

Использование при анализе удельного сопротивления горных пород логнормального закона распределения имеет и физическое обоснование. В кондуктивной электроразведке постоянным и низкочастотным током интенсивность аномалии определяется не разностью, а отношением удельных сопротивлений

объекта и вмещающей среды, т. е. разностью их логарифмов. Это и отражает логнормальный закон.

В методе вызванной поляризации аномалия зависит от избыточной поляризуемости, т. е. от разности между поляризуемостями объекта и вмещающей среды. В этом случае физической сущности формирования аномалии лучше соответствует нормальный закон распределения поляризуемости. Поэтому для оценки поляризационных свойств объекта или блока горной породы логично использовать среднее значение этого параметра. Однако для декомпозиции кривой распределения, т. е. для выделения частных распределений вариационная кривая, построенная исходя из нормального закона, неудобна. Обычно она не имеет левой ветви, а в направлении увеличения параметра появляется много непреставительных частных распределений с очень малым количеством определений. Поэтому для декомпозиции кривую распределения лучше строить исходя из логнормального закона. В дальнейшем при необходимости можно определить среднее значение поляризуемости для каждого частного распределения.

Соотношение между электрическими свойствами структурно-вещественных комплексов нагляднее всего можно представить на диаграмме. Для этого составляется геологическая колонка. На ней СВК удобнее располагать по порядку, по мере удаления от интересующего объекта. Рядом с каждым СВК показываются модальные или средние значения изучаемых параметров. Показываются также стандарты или предельные отклонения от средних значений. На рис. 1.6 приведена такая диаграмма для рассмотренного выше геоэлектрического разреза колчеданного месторождения (см. рис. 1.1).

На диаграмме хорошо видно по каким параметрам и насколько отличаются различные СВК. В частности видно, что рудовмещающие метасоматиты выделяются среди эффузивно-осадочных образований пониженным сопротивлением и повышенной поляризуемостью. Очень низким сопротивлением вы-

деляются колчеданные руды. Низкое сопротивление покровных отложений позволяет предполагать их экранирующее действие.

СВК	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$				$\eta, \%$	
	10^0	10^1	10^2	10^3	10^0	10^1
Покровные отложения		▨			▨	
Эффузивно-осадочные породы				▨	▨	
Метасоматиты			▨			▨
Колчеданные руды	▨					▨

Рис. 1.6. Пример диаграммы электрических свойств СВК колчеданного месторождения

В виде диаграммы удобно представлять данные об электрических свойствах горных пород и в тех случаях, когда количество определений недостаточно для обработки строгими статистическими способами. В этом случае показывают средние значения и диапазон изменения параметров (минимальные и максимальные значения).

1.4. Геоэлектрические ореолы месторождений полезных ископаемых

Геологические процессы, в результате которых образуются месторождения, воздействуют на горные породы. Это воз-

действие вызывает изменение физических свойств горных пород. Вблизи скопления полезного ископаемого образуется петрофизический, в нашем частном случае геоэлектрический ореол. Обычно размеры геоэлектрического ореола намного превышают размеры полезного объекта. Особенно важно, что ореол распространяется вверх к земной поверхности и глубина до него существенно меньше, чем глубина до самого объекта. Поэтому обнаружить ореол значительно легче. Таким образом, появляется возможность косвенных поисков месторождений на глубинах, недоступных для непосредственного обнаружения. При этом в благоприятных условиях могут быть использованы менее дорогостоящие малоглубинные методы электроразведки.

Геоэлектрические ореолы могут проявляться изменением всех электрических свойств: удельного сопротивления, поляризуемости, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости, а также анизотропии этих свойств. На месторождениях различных типов могут формироваться ореолы по разным электрическим свойствам и изменение этих свойств может происходить в разных направлениях. Ограничимся рассмотрением ореолов удельного сопротивления и поляризуемости, а также анизотропии этих параметров.

1.5. Геоэлектрические ореолы колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений

Наиболее хорошо изучены геоэлектрические ореолы колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений, поэтому рассмотрим их более подробно. Впервые мысль о наличии над колчеданными рудными телами зон повышенной электропроводности, распространяющихся к поверхности земли, была высказана в 1958 г. Г. П. Саковцевым. Основанием для этого послужили результаты работ на Ново-Шайтанском месторождении (Кировградский район). Там по методу вертикального поля были получены четкие аномалии над рудными телами, залегающими на глубине, соизмеримой с их размерами, чего,

согласно теории, быть не должно. Путем моделирования было показано, что подобные объекты могут вызывать аномалии только когда над ними есть подходящая к поверхности проводящая зона [28]. Понижение удельного сопротивления пород над рудными телами Ново-Шайтанского месторождения было установлено и при анализе результатов каротажа КС. Понижение удельного сопротивления было объяснено наличием в этой зоне сульфидной вкрапленности. Однако в выявленной в том же году проводящей зоне на Южно-Антипинском колчеданном рудопоявлении (Карпинский район) заметной сульфидной вкрапленности не наблюдалось.

В 1960-63 годах по инициативе Г. П. Саковцева кафедрой геофизики Свердловского горного института проводилось массовое изучение физических свойств горных пород на ряде колчеданных месторождений Южного Урала (И. И. Бреднев, А. А. Редозубов). Несколько позже такие работы были проведены на Чусовском месторождении на Среднем Урале. Измерения выполнялись на свежих образцах керна скважин. Всего было изучено около 15 тысяч образцов. Из электрических свойств кроме удельного сопротивления в меньшем объеме изучались поляризуемость, пористость и удельное сопротивление поровых вод.

В результате этих работ наличие ореолов повышенной электропроводности было установлено на всех изученных месторождениях. Было установлено, что главным фактором, определяющим удельное сопротивление пород (кроме руд), является открытая пористость. Удалось построить усредненную зависимость удельного сопротивления от коэффициента пористости, которая оказалась практически одинаковой для различных горных пород и месторождений (рис. 1.7). Выяснилось также, что геоэлектрические ореолы обычно не приурочены к определенному типу пород, а захватывают различные горные породы.

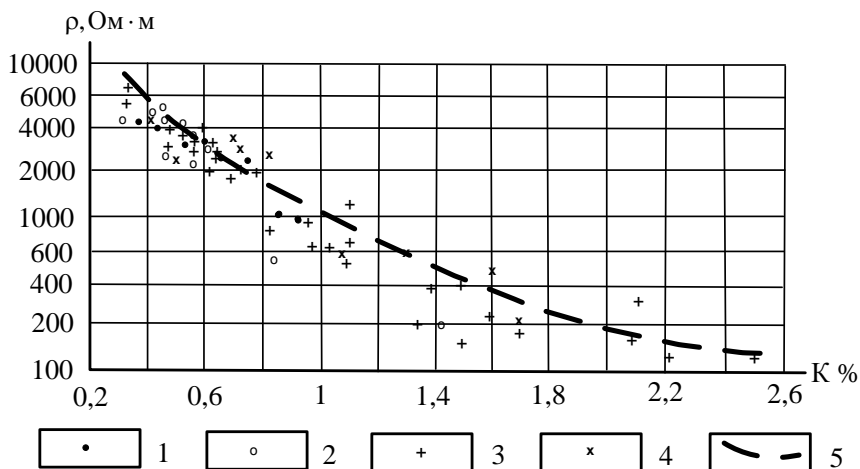


Рис. 1.7. График зависимости удельного сопротивления горных пород, вмещающих Маканское месторождение, от пористости:
 1 – порфириды диабазовые; 2 – альбитофиры; 3 – туфы и туфобрекчии; 4 – хлоритосерицитовые породы; 5 – график усредненной зависимости для месторождения

Очень четко отсутствие связи ореола повышенной электропроводности с определенными горными породами проявляется на месторождении Таш Тау (Баймакский район). Здесь рудоносный горизонт перекрыт толщей пострудных кварцевых порфиров. Несмотря на то, что в этих породах визуально не заметно каких-либо изменений, круто падающая на запад электропроводная зона над рудным телом проходит сквозь них до самой поверхности земли (рис. 1.8). Причиной понижения удельного сопротивления, как и в других случаях, является увеличение открытой пористости и, отчасти, уменьшение удельного сопротивления поровых вод.

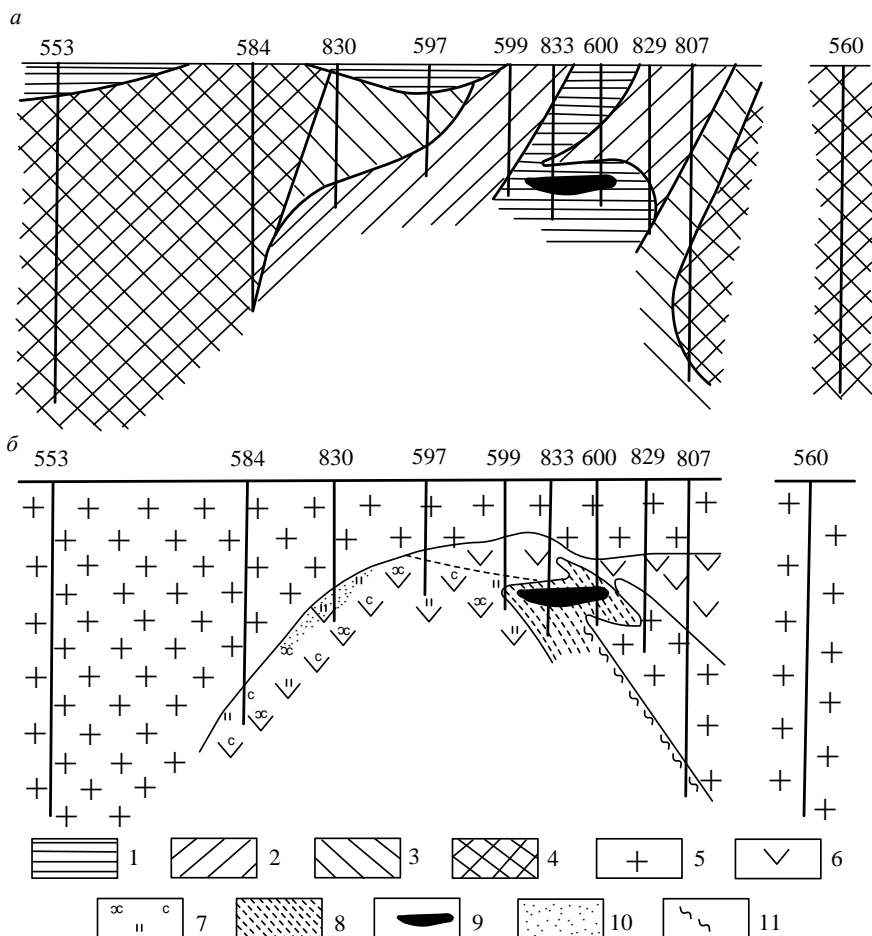


Рис. 1.8. Геоэлектрический разрез месторождения Таш Тау:
a – разрез по удельному сопротивлению; *б* – геологический разрез (по Н. К. Павловде, В. Н. Зайцеву и др.).

1 – $\rho < 1000$ Ом·м; 2 – $1000 < \rho < 2000$; 3 – $2000 < \rho < 4000$; 4 – $\rho > 4000$ Ом·м; 5 – кварцевые порфириты; 6 – диабазовые порфириты; 7 – хлоритизация, серицитизация, окварцевание; 8 – кварцевосерицитовые породы; 9 – массивные руды; 10 – вкрапленное оруденение; 11 – рассланцевание

В данном случае повышение коэффициента пористости можно было бы связать с тектонической зоной, к которой приурочено месторождение. Этот фактор, конечно, имеет место. Но

участие процессов рудообразования в формировании ореола доказывается его замыканием за северной границей оруденения (на южном фланге измерения не проводились). Замыкание ореола хорошо видно на плане изоом на горизонте 100 м (рис. 1.9).

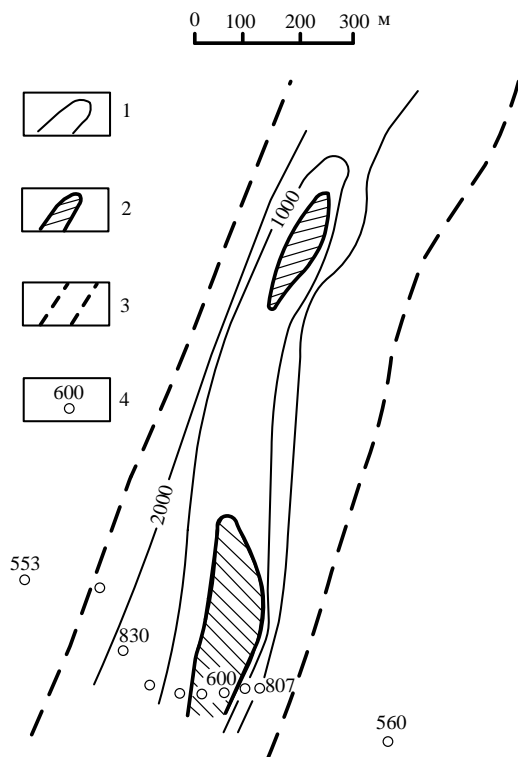


Рис. 1.9. План изолиний удельного сопротивления на горизонте 100 м (месторождение Таш Тау):
 1 – изолинии ρ ; 2 – обобщенные контуры рудных тел; 3 – контакты тектонической зоны (по М. Г. Калайтан); 4 – скважины

В отличие от ореола электропроводности, ореол повышенной поляризуемости не захватывает перекрывающие кварцевые порфириты, локализуясь в нижележащих породах, в которых залегает рудное тело (рис. 1.10). Такое положение ореола

поляризуемости понятно, поскольку кварцевые порфириты образовались после завершения процесса рудообразования и в них нет сульфидной минерализации. Размер ореола повышенной поляризуемости в широтном направлении около 300 м. Его граница совпадает с контактом кварцевых порфиритов (см. рис. 1.10 и 1.8).

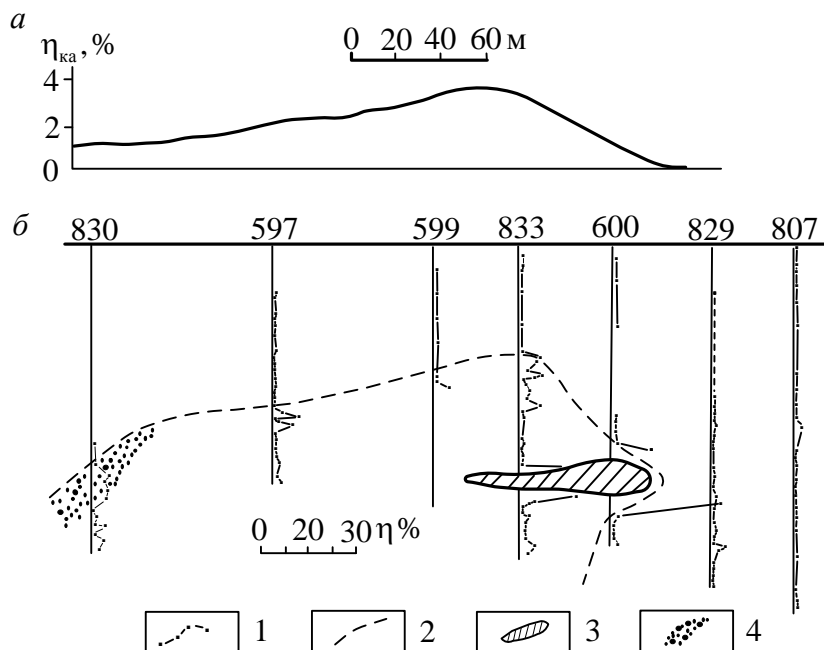


Рис. 1.10. Результаты изучения поляризуемости горных пород на месторождении Таш Тау (Северный Абей Саз):
a – график $\eta_{ка}$ (по Ю. А. Александрову); *b* – результаты изучения поляризуемости
 зерна скважин. 1 – графики η по скважинам; 2 – контур ореола повышенной по-
 ляризуемости; 3 – массивные руды; 4 – вкрапленное оруденение

Ореол электропроводности распространился в эти поро-
 ды под воздействием миграции поровых вод от рудного тела
 к поверхности земли. О существовании такой миграции сви-
 детельствует повышенная минерализация поровых вод в ореоле

электропроводности. Это, наряду с повышенной пористостью, о чем говорилось выше, вызвало появление ореола пониженного сопротивления.

На Чусовском месторождении породы рудовмещающего комплекса выходят непосредственно под рыхлые отложения и ореол повышенной поляризуемости распространяется до этого же уровня. Он имеет форму наклонного пласта, залегающего согласно с горными породами. Повышенная поляризуемость наблюдается не только в кварцево-серицитовых сланцах, непосредственно вмещающих оруденение, но и в эффузивных породах всяческого бока (рис. 1.11).

Аналогичная картина наблюдается на большинстве уральских колчеданных месторождений, так как обычно рудовмещающая толща не перекрыта пострудными образованиями. Поэтому ореолы поляризуемости в большинстве случаев распространяются до поверхности коренных пород.

Ореол повышенной электропроводности на Чусовском месторождении также имеет форму наклонного пласта и примерно совпадает с ореолом поляризуемости. Так, по скважине 63, пробуренной западнее рудной зоны (см. рис. 1.11), среднее удельное сопротивление по результатам изучения керна равно 2860 Ом·м. В рудной скважине 64 в интервале 6-176 м оно уменьшается до 1190 Ом·м.

Кроме повышенных электропроводности и поляризуемости геоэлектрический ореол Чусовского месторождения характеризуется повышенной анизотропией пород. По результатам картирования кажущийся коэффициент анизотропии в пределах ореола повышается до 1,6 на фоне $\lambda_k < 1,2$. Ореолы анизотропии электрических свойств рудовмещающих пород и возможности их использования для решения геологических задач будут рассмотрены в последующих разделах.

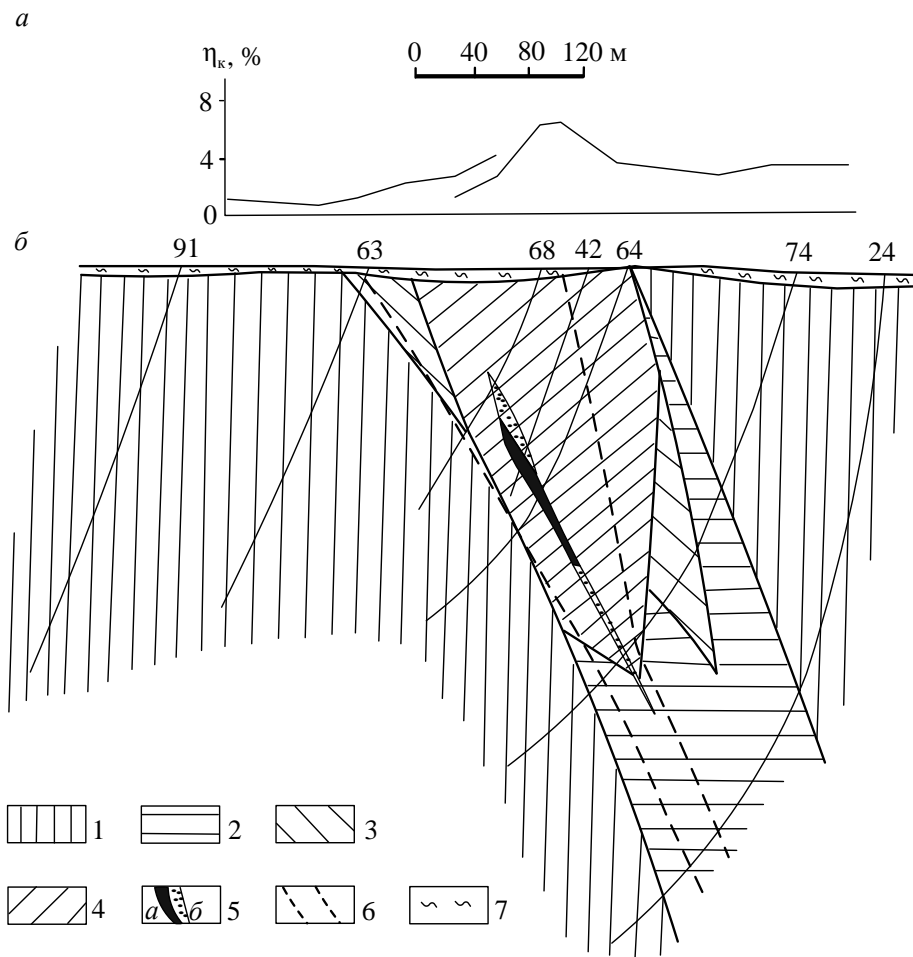


Рис. 1.11. Результаты изучения поляризуемости горных пород на Чусовском месторождении: *a* – график η_k (по М. В. Позднякову); *б* – геополяризационный разрез по результатам изучения керна скважин; 1 – $\eta_k < 2\%$; 2 – $2\% < \eta_k < 3\%$; 3 – $3\% < \eta_k < 4\%$; 4 – $\eta > 4\%$; 5 – колчеданные руды: *a* – массивные, *б* – вкрапленные; 6 – контур кварцевосерицитовых сланцев; 7 – рыхлые отложения

На колчеданно-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая наблюдаются геоэлектрические ореолы, аналогичные вышеописанным ореолам уральских колчеданных место-

рождений. По данным М. В. Семенова, алтайские месторождения приурочены к зонам пониженного удельного сопротивления и повышенной поляризуемости вмещающих пород [31].

1.6. Геоэлектрические ореолы месторождений других твердых полезных ископаемых

В литературе мало данных о специальном изучении геоэлектрических ореолов месторождений, кроме описанных выше колчеданных. Об их существовании можно судить по результатам полевых электроразведочных работ. Ширина аномалий ρ_k и η_k , как правило, существенно превышает мощность залежей полезных ископаемых. Большое количество таких примеров можно найти в монографии В. А. Комарова [16], а также в Справочнике геофизика [2, кн. 2].

Например, на Западно-Палянском ртутном месторождении (северо-восток России), ширина аномалии η_k в несколько раз превышает мощность промышленной залежи и даже выходит за пределы установленной области ртутной минерализации. Такую же ширину имеет аномалия ρ_k (рис. 1.12).

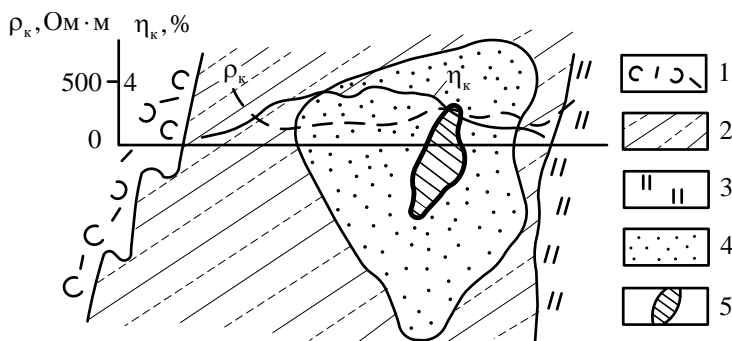


Рис. 1.12. Графики ρ_k и η_k на Западно-Палянском ртутном месторождении (по Б. Б. Шатрову и Г. А. Виллеру): 1 – туфы; 2 – сланцы; 3 – зона разлома; 4 – непромышленная ртутная минерализация; 5 – промышленное оруденение

Слюдоносные пегматитовые жилы на Кольском полуострове и в Карелии, по данным М. И. Голода [6], приурочены к

зонам пониженного сопротивления и повышенной поляризуемости. В этих зонах вмещающие жилы гнейсы претерпели гидротермальные изменения и содержат вкрапленность сульфидов. В результате этих гидротермальных процессов образовались и сами жилы. Пример аномалии ρ_k над жильной зоной приведен на рис. 1.13.

На приуроченность кварцевых жил к зонам пониженного сопротивления горных пород указывает С. Н. Кондрашов [8]. На месторождении пьезокварца на Южном Урале при анализе результатов каротажа было установлено, что продуктивные кварцевые жилы имеют оторочку пониженного сопротивления, образовавшуюся в результате гидротермального изменения вмещающих пород.

При изучении образцов керна, отобранных из скважин на Естюнинском железорудном месторождении (Средний Урал) установлено, что рудная залежь имеет оторочку, в пределах которой удельное сопротивление понижено по сравнению с вмещающими породами. Только в отличие от колчеданных месторождений в данном случае мощность ореола повышенной электропроводности небольшая.

1.7. Геоэлектрические ореолы и модели месторождений углеводородов

От залежей нефти и газа происходит миграция углеводородов, сероводорода и других веществ в окружающие породы.

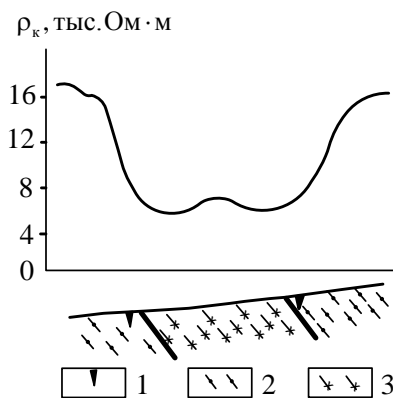


Рис. 1.13. Графики ρ_k на месторождении Гэдино (по М. И. Голоду).
1 — пегматитовые жилы; 2 — гранатобiotитовые гнейсы; 3 — дистено-гранатобiotитовые гнейсы

Взаимодействуя с горными породами, эти вещества вызывают изменение их минерального состава и структуры. В результате этого изменяются электрические свойства горных пород. Выделяющиеся из залежей газообразные продукты заполняют поры породы, вытесняя воду, что приводит к увеличению сопротивления. Могут также образовываться пленки керосина, которые приводят к повышению удельного сопротивления и поляризуемости горных пород.

Под воздействием углеводородов происходит карбонатизация пород. Вторичные карбонаты заполняют поры породы и таким образом уменьшают их водонасыщенность и увеличивают удельное сопротивление. О генетической связи вторичной карбонатизации с углеводородами свидетельствует корреляционная связь между ними. Она используется для геохимических поисков (метод галоэффекта). Американской кампанией Geosurvey было обследовано 400 месторождений нефти и газа. На 85 % из них были обнаружены аномалии галоэффекта. При опосредованном поиске площади 320000 км² было выявлено 160 аномалий вторичных карбонатов. На 38 из них бурением выявлены углеводороды [13]. Одновременно с карбонатизацией происходит сульфидизация, приводящая к повышению поляризуемости горных пород, часто значительному.

Имеющиеся сведения об эпигенетических изменениях вмещающих пород позволяют сформировать геоэлектрические модели залежей углеводородов. Система таких моделей была составлена Р. С. Сейфуллиным для Западной Украины. С некоторой корректурой она может быть принята и для других нефтегазоносных провинций.

При формировании моделей приняты во внимание следующие факторы:

- 1) повышение удельного сопротивления среды вокруг залежи и в перекрывающих ее породах, подвергшихся эпигенетическим изменениям под действием миграции углеводородов от залежи;

2) повышение поляризуемости этих же объемов среды и наличие в них источников естественных электрических полей;

3) факторы, затрудняющие миграцию вещества или, напротив, способствующие ей (слабопроницаемые горные породы, тектонические нарушения и т. п.).

В зависимости от сочетания различных факторов Р. С. Сейфуллинским предложены четыре варианта модели залежи углеводородов.

I. Перекрывающие залежь породы достаточно проницаемы, миграция углеводородов достигает верхней части разреза. В этом случае эпигенетические изменения охватывают большие объемы пород и достигают поверхности земли. Над залежью наблюдаются положительные аномалии ρ_k и η_k . Наблюдается также отрицательная аномалия естественного электрического поля (рис. 1.14, а).

II. Эпигенетические изменения развиваются непосредственно над залежью, а к поверхности земли распространяются по одному какому-то направлению, обычно по секущему залежь разлому. В этом случае аномалии ρ_k , η_k , и $U_{\text{ЕП}}$ в плане имеют вид узкой полосы, которая может быть смещена относительно залежи (см. рис. 1.14, б).

III. По периферии залежи развиты ослабленные зоны, по которым происходит миграция углеводородов и происходят эпигенетические изменения пород. Зоны эпигенетического изменения подходят близко к поверхности земли или даже достигают ее. В этом случае наблюдаются аномалии ρ_k , η_k и $U_{\text{ЕП}}$, имеющие кольцевую форму (см. рис. 1.14, в).

IV. Залежь перекрыта слабопроницаемыми породами, препятствующими миграции углеводородов к поверхности земли. В этом случае эпигенетические изменения пород происходят только в кровле залежи. Поэтому методами, имеющими малую глубину исследования, аномалии на поверхности земли не отмечаются (см. рис. 1.14, г).

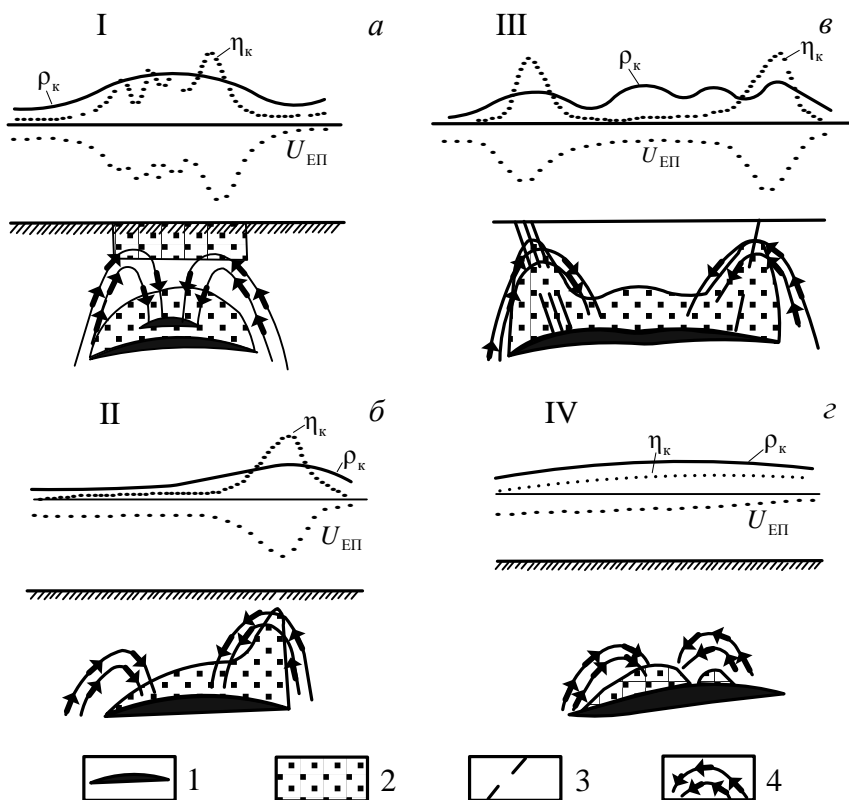


Рис. 1.14. Геоэлектрические модели залежей углеводородов (по Р. С. Сейфуллину):

1 – залежи углеводородов; 2 – зоны эпигенетических изменений; 3 – тектонические нарушения; 4 – токовые линии естественного электрического поля

Для обнаружения ореолов эпигенетических изменений, развитых в непосредственной окрестности залежи и не распространяющихся к поверхности земли, необходимы глубинные методы, например, зондирование становлением поля в ближней зоне. Ореолы в верхней части разреза могут быть выявлены методами, имеющими небольшую глубину исследования – до сотен, а иногда лишь до десятков метров.

Рассмотренные модели составлены применительно к условиям Западной Украины. В других регионах при сохранении общего характера ореолов могут появиться различия в деталях. Эти особенности необходимо учитывать при выборе методики исследований.

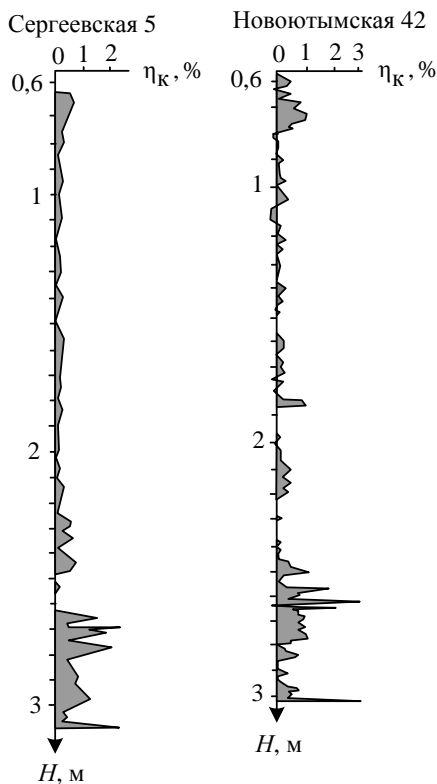


Рис. 1.15. Результаты каротажа ВП по "пустой" Сергеевской 5 и нефтеносной Новоютымской 42 скважинам (по В. С. Моисееву)

Например, в Западной Сибири по данным В. С. Моисеева на уровне продуктивных горизонтов горные породы имеют повышенную поляризуемость как вблизи залежей, так и вдали от них. Повышение поляризуемости вызвано, главным образом, повсеместно присутствующим в породах углистым веществом.

Поэтому, как указывает В. С. Моисеев, выделение непосредственно нефтяных залежей по поляризуемости невозможно даже при каротажных исследованиях. Но в верхних горизонтах на глубине 500-800 м над нефтяными залежами на всех изученных месторождениях наблюдается область повышенной поляризуемости [19].

Это положение иллюстрируется приведенными на рис. 1.15 результатами каротажа ВП по двум скважинам. В нефтеносной Новоютымской скважине выше области высоких значений η_k (выше $H = 2,5$ км) в интервале более 1,5 км породы практически не поляризуются. Но в интервале глубин примерно 600-800 м поляризуемость снова повышается. В "пустой" Сергеевской скважине на урне продуктивной толщи наблюдается такая же аномалия η_k , как и в продуктивной скважине. Но во всей толще вышележащих пород существенного повышения поляризуемости не отмечено.

Повышение поляризуемости пород в верхних горизонтах над нефтяными залежами объясняется наличием в породах мелкодисперсной сульфидной вкрапленности. Об этом свидетельствует корреляция η с содержанием в породе двухвалентной серы. Положение зоны повышенной поляризуемости в разрезе определяется наличием над ней регионального водоупорного горизонта, препятствующего дальнейшей миграции.

1.8. Примеры электроразведочных аномалий, вызванных ореолами месторождений углеводородов

В тех случаях, когда геоэлектрические ореолы достигают поверхности земли, они могут быть выявлены даже таким малоглубинным методом, как радиоволновое профилирование, глубина исследования которым не превышает первых десятков метров. Впервые с такой целью этот метод был опробован в 70-х годах в Белоруссии и после получения положительных результатов был включен в комплекс. В приведенном на рис. 1.16

примере над нефтяной залежью, залегающей на глубине около 2,5 км, напряженность поля увеличивается до 6-9 относительных единиц при фоне 3 единицы. По методу вызванной поляризации в пределах этой аномалии наблюдается повышение η_k до 20 % на фоне 5 % и пятикратное увеличение ρ_k .

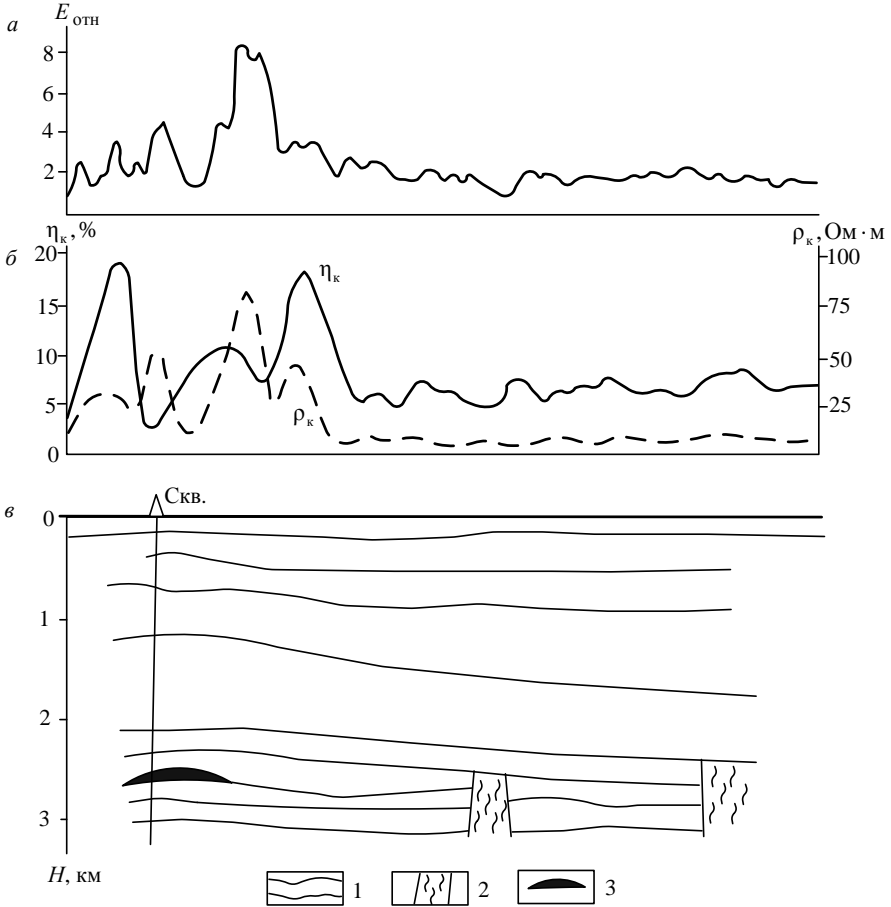


Рис. 1.16. Результаты геофизических работ на Западно-Бобровическом нефтепроявлении (по Ю. Н. Стаднику):

a – график $E_{отн}$ радиоволнового профилирования ($f=15,1$ кГц); *б* – результаты метода вызванной поляризации (η_k при $t_{стп}=30$ мс); *в* – сейсмогеологический разрез.

1 – сейсмические отражающие горизонты; 2 – тектонические нарушения; 3 – нефтепроявление в подсолевых карбонатных отложениях

Другим примером проявления ореолов углеводородных залежей в малоглубинной электроразведке могут служить результаты ВЭЗ, полученные в Удмуртии в 50-х годах прошлого столетия. Зондирования с разносами AB до 6 км проводились с целью изучения структуры опорного горизонта высокого сопротивления в пермских отложениях на глубине 300-600 м. Предполагалось, что эти структуры отражают строение более глубоких горизонтов. Поставленная задача не была решена, так как точность определения глубин оказалась недостаточной, и о результатах этих работ забыли.

Анализ результатов ВЭЗ с ориентировкой на выявление не структур, а геоэлектрических ореолов, показывает, что большинство известных месторождений отмечается повышенными значениями ρ_k начиная с самых малых разносов AB . Если бы о таком проявлении ореолов углеводородных залежей было известно в период проведения описываемых работ, ВЭЗ можно было бы включить в поисковый комплекс и получить существенную экономию за счет сокращения таких дорогостоящих видов работ, как сейсморазведка и бурение [13].

Рассмотрим в качестве примера результаты работ на Дебесском месторождении (рис. 1.17, б). Здесь повышение ρ_k над западной частью нефтяной залежи начинается с самых малых разносов питающих электродов и достигает 40-50 % от среднего уровня. При увеличении размеров установки область повышенных значений ρ_k расширяется, а интенсивность аномалии уменьшается. Это естественно, так как при увеличении размеров установки ρ_k определяется свойствами все большего объема пород и вклад в него плохо проводящего объекта уменьшается. Повышение удельного сопротивления пород отмечается и по каротажу КС в пробуренных на этом участке скважинах. Приуроченность области повышенного сопротивления к краевой части залежи объясняется по-видимому наличием здесь проницаемой зоны (второй или третий тип геоэлектрической модели по Р. С. Сейфуллину).

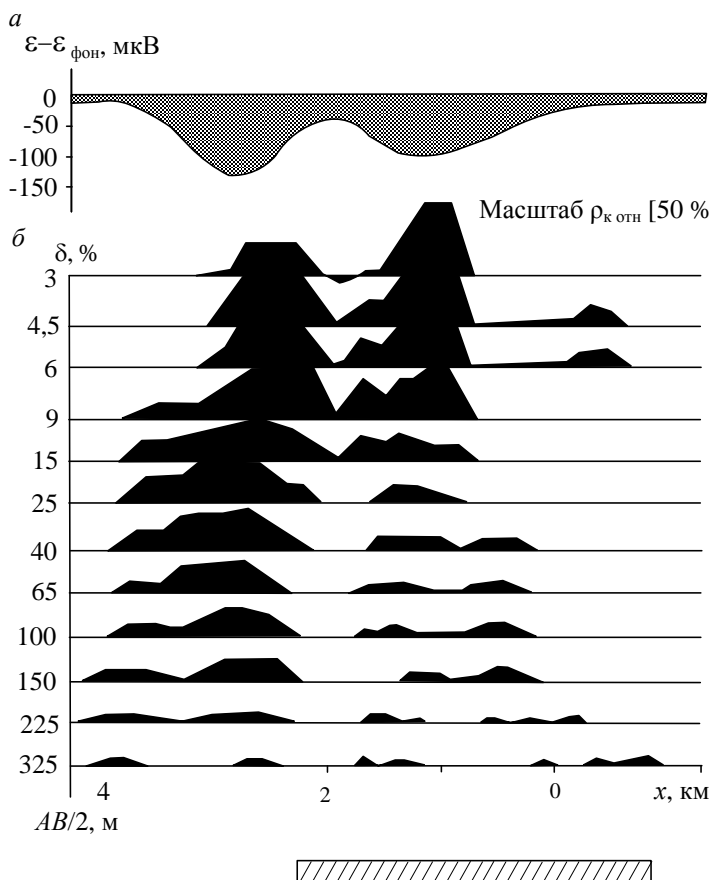


Рис. 1.17. Результаты электроразведки на Дебесском месторождении [13]:

a – аномалия АМПП; *b* – графики относительной аномалии ρ_k для различных размеров установки по данным ВЭЗ. Заштрихованный прямоугольник – положение нефтяной залежи

Ореол повышенного сопротивления четко выявляется и по результатам аэроварианта МПП. Над описываемой зоной уменьшение напряженности поля в АМПП достигает 50-100 мкВ (см. рис. 1.17, *a*). Аномалия отрицательная, так как вызвана объектом более высокого сопротивления, чем вмещающая среда.

Положительные результаты получены по АМПШ и в Ханты-Мансийском национальном округе. Фрагмент карты локальных отрицательных аномалий АМПШ приведен на рис. 1.18. Находящаяся в пределах участка Верхне-Салымская структура, к которой приурочено одноименное месторождение, отмечается четкой кольцевой аномалией (третий тип геоэлектрической модели). В юго-восточном углу участка наблюдается линейная аномальная зона, связанная, по-видимому, с тектоникой. В пределах этой зоны у южной рамки участка наблюдается локальная аномалия, пространственно совпадающая с предположительно продуктивной Гусеничной структурой.

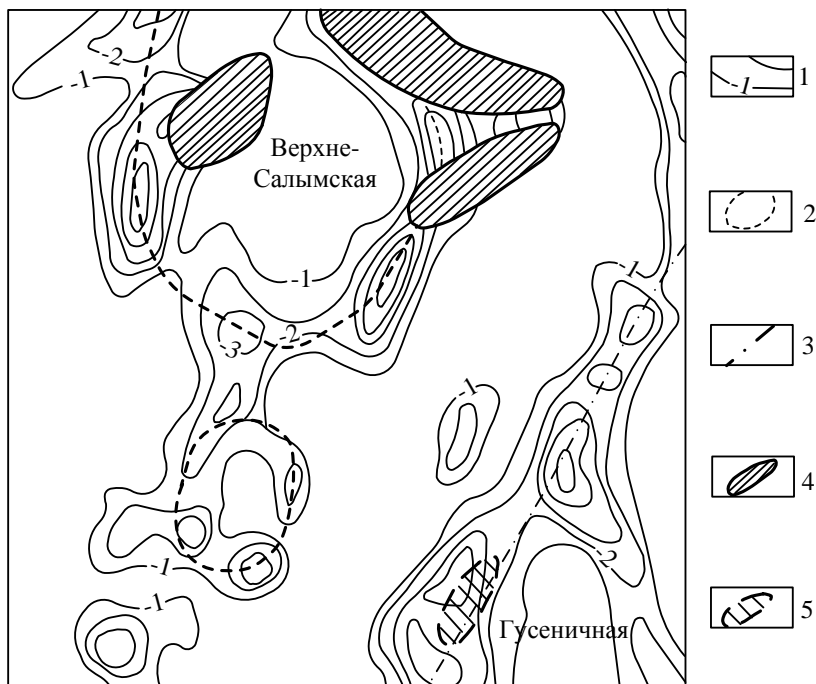


Рис. 1.18. Фрагмент карты локальных аномалий АМПШ Уватско-Салымской площади [13]:

1 – изолинии отрицательных локальных аномалий $\Delta\gamma_k$, мСм/м (сечение изолиний через 1 мСм/м); 2 – кольцевые аномальные зоны по данным АМПШ; 3 – линейная аномальная зона по данным АМПШ; 4 – контуры нефтеносности; 5 – предполагаемая ловушка углеводородов по геологическим и сейсмическим данным

На рассматриваемой площади продуктивные баженовская и тюменская свиты залегают на глубине порядка 3 км. Они перекрываются толщей глин, аргиллитов и песчаников. Миграции газов от залежей углеводородов в верхнюю часть разреза способствуют высокая температура и высокое пластовое давление. Наиболее интенсивная миграция происходит по секущим залежи разломам, что и отражается на результатах АМПП. Следует отметить относительно низкую стоимость таких работ. Стоимость съемки АМПП составляет около 1,5 % стоимости изучения такой же площади сейсморазведкой.

Как уже отмечалось, при миграции углеводородов происходит образование вторичных сульфидов над залежами, приводящее к повышению поляризуемости горных пород. ореол повышенной поляризуемости может охватывать всю перекрывающую толщу или занимать определенное положение в разрезе.

Например, в Прикаспии над нефтяными месторождениями получены четкие аномалии ВЭЗ-ВП. На вертикальной карте η_k область повышенных значений наблюдается с самых малых разносов *AB*. На плане изолиний η_k область аномальных значений этого параметра совпадает с контуром нефтеносности (см. [1, ч.1, с. 362]).

Пример четкой аномалии η_k над нефтепроявлением в Белоруссии был приведен на рис. 1.16, б.

В обоих приведенных выше примерах ореол повышенной поляризуемости захватывает всю толщу пород, перекрывающую нефтяную залежь и распространяется до поверхности земли, вызывая появление аномалии.

В Западной Сибири продуктивные горизонты повсеместно характеризуются повышенной поляризуемостью. Локальные области повышенной поляризуемости над залежами углеводородов по данным В. С. Моисеева наблюдаются в интервале глубин 500-1000 м. Поэтому поисковые задачи можно решать изучая поляризуемость горных пород на этой относительно не-

большой глубине. Это позволяет использовать умеренные размеры установок – порядка 1500 м.

Тем не менее выполнение работ встречает серьезные трудности. Эти трудности вызваны малой интенсивностью аномалий η_k и сильным влиянием индукционных эффектов, связанных с процессами становления поля. Поэтому для условий Западной Сибири предложена специальная методика проведения измерений и обработки результатов [19].

Индукционные эффекты имеют большую интенсивность при малых временах после выключения тока, но с течением времени затухают быстрее, чем поле вызванной поляризации. Так как знак $\Delta U_{\text{инд}}$ противоположен знаку $\Delta U_{\text{ВП}}$, на малых временах или при малых значениях η_k измеряемая разность потенциалов уменьшается и может даже стать отрицательной. Интенсивность индукционных эффектов возрастает при увеличении размеров установки и уменьшении удельного сопротивления пород. Последнее характерно для Западной Сибири и вызывает дополнительные трудности при выполнении работ, так как приводит к уменьшению измеряемой разности потенциалов.

Для более уверенного выделения локальных аномалий ВП измерения выполняют в достаточно большом интервале времени – до $t_{\text{сп}} = 1-3$ с. Для каждого значения времени определяют нормальное поле, как среднее значение η_k по профилю. Затем в каждой точке вычисляют аномальное значение кажущейся поляризуемости $\eta_{\text{ка}}$, как разность между измеренным значением и нормальным полем. Результаты измерений по профилю представляют в виде временного разреза, аналогично тому, как это делается в зондировании методом переходных процессов.

В качестве примера рассмотрим результаты, полученные на Колотушном месторождении (рис. 1.19). Нефтяная залежь, расположенная на глубине около 2,5 км, не может оказывать какое-либо влияние на результаты измерений с $AB = 1440$ м. Полученная аномалия может быть вызвана только объектом, залегающим на значительно меньшей глубине. В интервале

времен 100-600 мс над залежью на временном разрезе $\eta_{ка}$ наблюдается отчетливая положительная аномалия. Максимальные значения $\eta_{ка}$, превышающие 0,3 %, соответствуют времени спада 100-200 мс. По обе стороны положительной аномалии наблюдаются отрицательные значения $\eta_{ка}$. Их появление можно объяснить ограниченностью поляризующегося объекта по глубине и тем, что при отсутствии аномалии поляризуемости индукционные эффекты уменьшают значения $\eta_{к}$, которые становятся ниже фоновых.

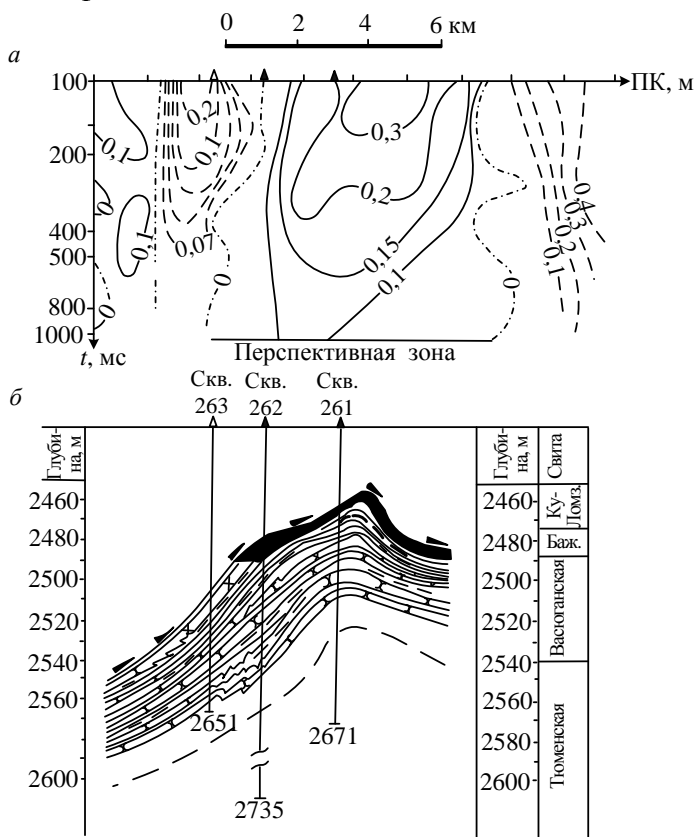


Рис. 1.19. Результаты метода вызванной поляризации на Колотушном месторождении (по В. С. Моисееву):
а – временной разрез $\eta_{ка}$; *б* – продуктивная часть геологического разреза (нефтяная залежь залита черным)

На рис. 1.20 приведены результаты площадной съемки по методу вызванной поляризации на Новоютымской площади (Тюменская область). Пробуренные в северо-западной части структуры скважины 40 и 46 дали приток нефти. Но в последующих скважинах 47 и 43 нефти не оказалось. После этого по имевшейся редкой сети сейсмических профилей были выполнены работы по методу вызванной поляризации. Выявленная аномалия повышенной поляризуемости захватывает западную часть структуры и ее западный фланг. Контуры аномалии поляризуемости совпадают с контурами нефтяной залежи, установленными последующим бурением (см. рис. 1.20). Несовпадение результатов бурения скважин 49 и 51 с данными метода ВП могут объясняться отсутствием здесь наблюдений из-за редкой сети профилей.

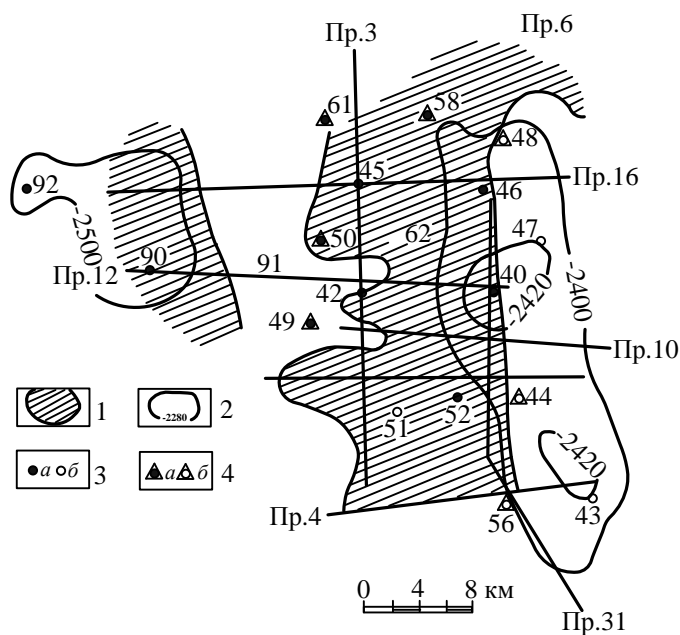


Рис. 1.20. Контуры нефтеперспективных зон, выделенных по методу ВП на Новоютымской площади (по В. С. Моисееву):
 1 – аномальная область по данным ВП; 2 – изолинии рельефа фундамента по данным сейсморазведки; 3 – скважины с нефтью (а) и водой (б); 4 – скважины с нефтью (а) и водой (б), пробуренные после постановки электроразведочных работ

Западнее описанного участка располагается другое нефтяное месторождение. Наблюдения методом ВП выполнены только в самой восточной его части. Здесь также получена аномалия поляризуемости (см. рис. 1.20).

Таким образом, для многих типов месторождений полезных ископаемых характерно наличие геоэлектрических ореолов, имеющих более значительные размеры по сравнению с самими залежами и подходящих значительно ближе к поверхности земли. Это создает предпосылки для обнаружения объектов, залегающих на глубинах, недоступных для наземных электро-разведочных методов или для применения менее дорогостоящих малоглубинных методов.

2. МЕТОДЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И ИЗУЧЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1. Общие положения

При поисках и изучении месторождений полезных ископаемых обычно стоит задача обнаружения и изучения локальных, т. е. трехмерных объектов. Как сами залежи, так и их геоэлектрические ореолы являются трехмерными объектами. Даже если геоэлектрический ореол имеет значительные размеры, при использовании установок достаточно больших размеров и изучении электрического поля на большой площади, он проявляет себя как локальный объект. Например, геоэлектрический ореол Озерного колчеданного месторождения в поле удаленного питающего заземления (метод мелкомасштабного заряда) выделяется аномалией, ничем кроме размеров не отличающейся от аномалии, вызванной незаряженным рудным телом. Длина аномалии составляет около 1,5 км. Само рудное тело, имеющее поперечник порядка 300 м, на фоне аномалии от геоэлектрического ореола не выделяется.

Для локальных объектов характерна зависимость интенсивности, а иногда и формы аномалии от ориентировки поля относительно объекта, если он не изометричен и от соотношения между размерами объекта и глубиной его залегания. В ряде случаев наблюдается зависимость вида и интенсивности аномалии от соотношения между размером установки и размером и глубиной залегания объекта.

2.2. Аномалия от шара в поле точечного источника тока

Точное решение задачи о поле точечного источника в присутствии локального объекта известно лишь для случая, когда объект имеет форму шара. Решение получено А. И. Заборовским (Заборовский А. И. Специальные функции для геофизиков-разведчиков. М.–Л.: ГОНТИ, 1939. 203 с.). Интегрирование

дифференциального уравнения Лапласа, когда источник расположен во вмещающей среде ($U^{(1)}$) или внутри объекта ($U^{(2)}$), приводит к следующим выражениям потенциала в произвольной точке M , расположенной снаружи (U_1) и внутри (U_2) шара:

$$\begin{aligned}
 U_1^{(1)} &= \frac{I\rho_1}{4\pi L} \frac{1}{L} - \frac{I\rho_1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2} \frac{a^{2n+1}}{(rd)^{n+1}} P_n(\cos\theta) = U_0 + U_{a1}^{(1)}, \\
 U_2^{(1)} &= \frac{I\rho_1}{4\pi L} \frac{1}{L} - \frac{I\rho_1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2} \frac{r^n}{d^{n+1}} P_n(\cos\theta) = U_0 + U_{a2}^{(2)}, \\
 U_1^{(2)} &= \frac{\rho_2 I}{4\pi L} \frac{1}{L} + \frac{\rho_2 I}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2} \frac{d^n}{r^{n+1}} P_n(\cos\theta) = U_0 + U_{a1}^{(2)}, \\
 U_2^{(2)} &= \frac{\rho_2 I}{4\pi L} \frac{1}{L} + \frac{\rho_2 I}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(n+1)(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2} \frac{(rd)^n}{a^{2n+1}} P_n(\cos\theta) = U_0 + U_{a2}^{(2)}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где I – сила тока, стекающего с источника A ; $P_n(\cos\theta)$ – полиномы Лежандра n -го порядка. Остальные обозначения ясны из рис. 2.1. Первое слагаемое определяет нормальное поле точечного источника, второе – аномальную компоненту потенциала. Если в первых двух уравнениях в определяющей аномальный потенциал части вынести из под знака суммы d^2 , перед суммой

будет коэффициент $\frac{I\rho_1}{4\pi} \frac{1}{d^2}$,

равный напряженности первичного поля E_0 в центре шара. Таким образом, в поле точечного источника, как и в однородном поле, аномалия от шара пропорциональна напряженности нормального поля в центре шара.

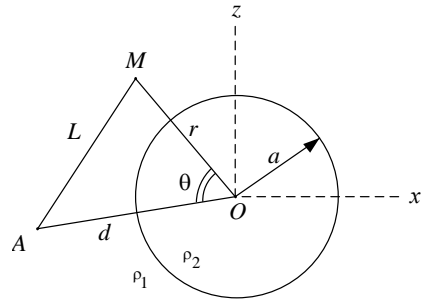


Рис. 2.1. К расчету аномалии от шара

Если удалять источник от шара, так чтобы было $d \gg a$ и $d \gg r$, можно в уравнениях (2.1) ограничиться первым членом ряда ($n = 1$), так как все остальные члены ряда – малые величины более высоких порядков. В этом случае во внешней среде

$$U_1 \approx U_0 - \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} E_0 \frac{a^3}{r^2} \cos \theta.$$

Перейдя к прямоугольной системе координат (см. рис. 2.1) и учитывая, что $\cos \theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$, получим, полагая $x_A \rightarrow -\infty$:

$$U_1 = U_0 + \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} E_0 a^3 \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (2.2)$$

т. е. выражение для потенциала в однородном первичном поле (см. [1, ч.1, разд. 5.3]). Знак у выражения аномального потенциала изменился из-за того, что когда $x_A \rightarrow -\infty$, при $x > 0$ угол $\theta > 90^\circ$ и $\cos \theta < 0$.

Внутри шара при $d \rightarrow \infty$

$$U_2 = U_0 - \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} E_0 r \cos \theta = U_0 + \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} E_0 x. \quad (2.3)$$

Таким образом, во внутренней области электрическое поле практически однородно и не зависит от размеров объекта, как и в случае однородного первичного поля.

2.3. Аномалия от хорошо проводящего шара

Если $\rho_2 \ll \rho_1$, выражение для потенциала во вмещающей среде упрощается и при конечном расстоянии d до источника, так как

$$\frac{n(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2} \Big|_{\rho_2 \rightarrow 0} \rightarrow 1.$$

В этом случае

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\frac{1}{L} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{2n+1}}{r^{n+1} d^{n+1}} P_n(\cos \theta) \right].$$

Используя известные из теории функций Лежандра преобразования, можно избавиться от бесконечной суммы и записать выражение для потенциала через элементарные функции:

$$U_1 = \frac{I\rho_1}{4\pi} \left[\frac{1}{L} + \frac{a}{rd} - \frac{a}{\sqrt{(d^2 - a^2)(r^2 - a^2) + a^2L^2}} \right]. \quad (2.4)$$

Задача об аномалии от хорошо проводящего шара может быть решена методом зеркальных изображений [20]. Первое слагаемое в выражении аномальной компоненты потенциала $\frac{\rho_1}{4\pi} I \frac{a}{d} \frac{1}{r}$ можно трактовать, как потенциал фиктивного источника, расположенного в центре шара, с которого стекает ток $I \frac{a}{d}$. Второе слагаемое – потенциал фиктивного источника A' , той же мощности, но противоположного знака, смещенного от центра шара по радиусу в сторону действительного источника A на расстояние a^2/d (рис. 2.2). Источник A' является изображением источника A в сферическом зеркале, совпадающем с поверхностью шара.

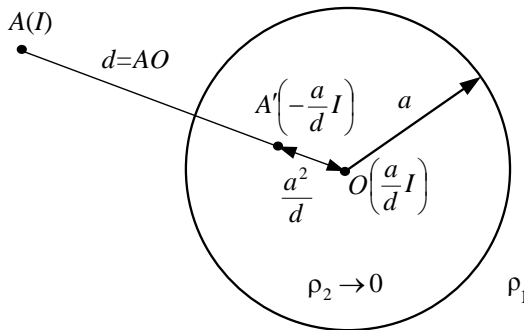


Рис. 2.2. К расчету аномалии от хорошо проводящего шара ($\rho_2 \rightarrow 0$) методом зеркальных изображений

Таким образом, аномалия от хорошо проводящего шара в поле точечного источника эквивалентна полю диполя конечных

размеров, ориентированного по линии, соединяющей центр шара с источником. В центре шара располагается полюс диполя того же знака, что и источник поля A . Размер диполя тем меньше, чем дальше располагается источник поля от объекта.

В случае шара конечной проводимости зависимость аномалии от соотношения удельных сопротивлений объекта и вмещающей среды определяется коэффициентом

$$p = \frac{n(\rho_1 - \rho_2)}{n\rho_1 + (n+1)\rho_2}.$$

При $n = 1$ $p_{n=1} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2}$, т. е. первый член ряда, всегда имеющий наибольшую величину, зависит от соотношения удельных сопротивлений так же, как интенсивность аномалии в случае однородного первичного поля. При $n \rightarrow \infty$

$$p_{n \rightarrow \infty} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \frac{n+1}{n}\rho_2} \rightarrow \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = -k_{12}.$$

При всех других значениях n коэффициент p имеет промежуточную величину.

Разница между $p_{n=1}$ и $p_{n \rightarrow \infty}$ тем меньше, чем меньше удельное сопротивление объекта по сравнению с ρ_1 . При $\rho_2 = 0,1\rho_1$, $p_{n=1} = 0,75$, а $p_{n \rightarrow \infty} = -k_{12} = 0,818$, т. е. $p_{n \rightarrow \infty}$ отличается от $p_{n=1}$ на 9,07 %. Очевидно, если у всех членов ряда принять коэффициент p равным p_1 , погрешность будет меньше 9,07 %, так как каждый последующий член ряда меньше предыдущего и вносит меньший вклад в величину потенциала. Поэтому при $\rho_2 \leq 0,1\rho_1$ можно пользоваться выражением потенциала для случая идеально проводящего шара, введя перед аномальной компонентой коэффициент p_1 :

$$U \approx \frac{I\rho_1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{L} + \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \left[\frac{a}{rd} - \frac{a}{\sqrt{(d^2 - a^2)(r^2 - a^2) + a^2L^2}} \right] \right\}. \quad (2.5)$$

2.4. Учет границы раздела "земля-воздух" в присутствии шара

Учет границы раздела "земля-воздух" производится путем отражения нижнего полупространства в плоскости поверхности земли. В этом случае расчет первого приближения сводится к расчету аномалии от двух объектов (действительного и отраженного) в поле двух источников (действительного и отраженного). Этим первым приближением можно ограничиваться, когда глубина до центра объекта не меньше полутора его радиусов. В случае хорошо проводящего шара можно рассчитать аномалию и при меньшей глубине расположения объекта. Для этого необходимо рассчитывать последующие приближения, т. е. учитывать взаимное влияние объектов. Каждый из шаров, точнее заменяющий его диполь, вызывает аномалию следующего порядка от другого шара (рис. 2.3).

Если источник поля или точка наблюдений располагаются на поверхности земли, расстояния d, d', d_1 и d'_1 (в первом случае) или r и r' (во втором случае) становятся одинаковыми. В этом случае учет влияния поверхности земли на аномалию от шара производится удвоением нормальной и учетверением аномальной компоненты потенциала.

При расположении и источника тока A , и точки наблюдений M на поверхности

земли, выражение потенциала при $\rho_2 \leq 0,1\rho_1$ принимает вид:

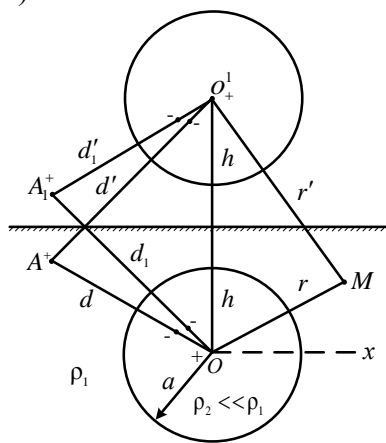


Рис. 2.3. К учету границы раздела "земля - воздух"

$$U \approx \frac{I\rho_1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{L} + 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \left[\frac{a}{rd} - \frac{a}{\sqrt{(d^2 - a^2)(r^2 - a^2) + a^2 L^2}} \right] \right\}. \quad (2.5')$$

Этой формулой можно пользоваться для расчета поля в присутствии хорошо проводящего шара при произвольном расположении источника тока и точки наблюдений на поверхности земли. Зная потенциал можно найти напряженность поля или разность потенциалов, а затем кажущееся сопротивление.

2.5. Кажущееся сопротивление в присутствии шара. Оценка необходимого размера установки

В прямоугольной системе координат с началом в центре шара входящие в уравнение (2.5') величины d , r и L определяются выражениями:

$$d = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + h^2};$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2};$$

$$L = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2},$$

где x и y – координаты точки наблюдений; x_0 и y_0 – координаты источника; h – глубина до центра шара. Найдем кажущееся сопротивление, измеряемое трехэлектродной установкой AMN по профилю, ориентированному параллельно оси x . Так как и точка наблюдений и питающий электрод A расположены на профиле, $y_0 = y$. Размер установки $AO = L \gg MN$. В этом случае кажущееся сопротивление при $\rho_2 < 0,1\rho_1$ определяется формулой:

$$\rho_k = 2\pi L^2 \frac{E_x}{I} \approx \rho_1 \left\{ 1 + 2aL^2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \left[\frac{x}{(x^2 + y^2 + h^2)^{3/2} \sqrt{x_0^2 + y^2 + h^2}} - \frac{x(x_0^2 + y^2 + h^2 - a^2) + a^2 L}{[(x_0^2 + y^2 + h^2 - a^2)(x^2 + y^2 + h^2 - a^2) + a^2 L^2]^{3/2}} \right] \right\}. \quad (2.6)$$

Когда точка наблюдений совпадает с проекцией центра шара на линию профиля, т. е. когда $x = 0$, $x_0 = x - L = -L$, выражение (2.6) принимает вид:

$$\rho_k \approx \rho_1 \left\{ 1 - 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{a^3}{\left[y^2 + h^2 + \frac{(y^2 + h^2 - a^2)^2}{L^2} \right]^{3/2}} \right\}. \quad (2.7)$$

Последняя формула справедлива и для симметричной установки, так как в этом случае $\rho_k^{AMNB} = \rho_k^{AMN} = \rho_k^{MNB}$.

Из уравнений (2.6) и (2.7) следует, что при малых размерах установки, когда $L \ll h$, кажущееся сопротивление стремится к удельному сопротивлению вмещающей среды ($\rho_k \rightarrow \rho_1$). При размерах установки, намного превышающих расстояние до центра шара, кажущееся сопротивление стремится к асимптотическому значению, имеющему промежуточную величину между удельными сопротивлениями объекта и вмещающей среды. Аномалия при больших размерах установки имеет максимальную интенсивность и не отличается от аномалии в однородном первичном поле. При $x=0$ асимптотическое значение кажущегося сопротивления определяется выражением:

$$\rho_{k\text{ас}} = \rho_1 \left[1 - 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{a^3}{(y^2 + h^2)^{3/2}} \right]. \quad (2.8)$$

При меньших размерах установки ρ_k отличается от асимптотического значения и аномалия имеет интенсивность меньше максимально возможной. Размер установки можно полагать достаточным, если ρ_k отличается от $\rho_{k\text{ас}}$ не более, чем на допустимую погрешность измерения, т. е. не более, чем на 5 %.

Оценим необходимый размер симметричной установки при поисках изометричных проводящих объектов с $\rho_2 \ll \rho_1$. Кажущееся сопротивление отличается от $\rho_{k\text{ас}}$ в пределах погрешности измерений, если

$$\frac{\rho_k - \rho_{k \text{ас}}}{\rho_{k \text{ас}}} \leq 0,05. \quad (2.9)$$

Подставив в это неравенство значения кажущихся сопротивлений из выражений (2.7) и (2.8), над центром объекта ($y=0$) получим:

$$\frac{1 - 2p \frac{a^3}{\left[h^2 + \frac{(h^2 - a^2)^2}{L^2} \right]^{3/2}} - 1 + 2p \frac{a^3}{h^3}}{1 - 2p \frac{a^3}{h^3}} \leq 0,05,$$

где $p = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2}$.

Решив полученное уравнение относительно L , найдем необходимый размер установки:

$$\frac{L}{a} \geq \frac{(h/a)^2 - 1}{\sqrt{\frac{(2p)^{2/3}}{\left[\frac{2,1p}{(h/a)^3} - 0,05 \right]^{2/3}} - (h/a)^2}}. \quad (2.10)$$

Оценим необходимый размер установки для конкретного примера. Пусть глубина до центра изометричного объекта $h=1,5a$. Тогда при $\rho_2 \rightarrow 0$ ($p=1$) размер установки $L/a=5,2$. Если радиус объекта 100 м, необходимый размер установки $AB/2=1040$ м ≈ 1 км. С такой симметричной установкой следует в данном случае выполнять профилирование. При зондировании, для того, чтобы получить конечную асимптоту, максимальный разнос $AB/2$ надо принять примерно вдвое большим, т. е. 2 км.

Если $\rho_2=0,1\rho_1$, $p=0,75$, при данных глубине залегания и размере объекта $L/a=4$. В этом случае при профилировании надо использовать установку с $AB/2=800$ м, а при зондировании $AB/2_{\text{макс}} \approx 1,5$ км.

Уменьшение необходимого размера установки во втором

примере объясняется тем, что при конечном удельном сопротивлении объекта уменьшаются интенсивность аномалии и максимальная глубина, на которой объект может быть обнаружен. Поэтому уже при меньшем размере установки дальнейшее увеличение разности AB становится бессмысленным, так как не может привести к увеличению интенсивности аномалии на величину, превышающую погрешность измерений.

Предельную глубину обнаружения объекта можно найти, решив относительно h уравнение (2.7), положив $y=0$, $L \rightarrow \infty$ и задав минимальную интенсивность аномалии. Если принять, что минимальная интенсивность надежно выделяемой аномалии 25 %, то в рассмотренном примере при $\rho_2 \rightarrow 0$ $h_{\text{макс}}=2a$, т. е. 200 м, а при $\rho_2=0,1\rho_1$ $h_{\text{макс}}=1,8a$, т. е. 180 м. Глубина до верхней кромки объекта составляет соответственно 100 м и 80 м.

2.6. Зависимость аномалии от ориентировки поля относительно неизометричного локального объекта

Зависимость интенсивности аномалии от ориентировки первичного поля относительно объекта рассмотрим на примере эллипсоида в однородном электрическом поле. Так как описывающие аномалию уравнения [20] анализу в общем виде не поддаются, рассмотрим конкретный численный пример.

Пусть объект с удельным сопротивлением ρ_2 имеет форму трехосного эллипсоида с отношением полуосей $a:b:c=1:0,5:0,1$. Расстояние от профиля до верхней кромки объекта при любой его ориентировке равно $0,25a$. Удельное сопротивление вмещающей среды ρ_1 .

Значения относительной интенсивности аномалии A при ориентировке поля по разным осям эллипсоида при различных соотношениях ρ_2/ρ_1 приведены в виде таблицы на рис. 2.4. Интенсивность аномалии указана без учета влияния границы земля-воздух, так как при заданной глубине до объекта учет влияния земной поверхности путем удвоения аномальной компоненты поля был бы не корректным. Очевидно, как и в

случае изометричного объекта, влияние поверхности земли должно приводить к увеличению аномального эффекта, но при данной глубине до объекта меньшему, чем в два раза. Для сравнения на рисунке приведены данные об аномалии от шара, расположенного на том же расстоянии от профиля.

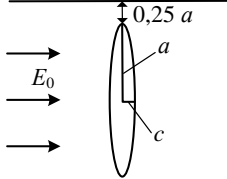
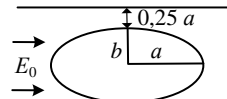
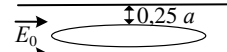
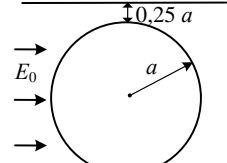
<p>Модель 1 Проф.</p> 	$\rho_2 < \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	0	0,01	0,1	0,2	0,33	0,5	
		$A \%$	11,34	11,23	9,97	8,64	6,97	5,03	
		$A/A_{\text{макс}}$	1	0,99	0,88	0,76	0,61	0,44	
	$\rho_2 > \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	∞	100	10	5	3	2	
		$A \%$	43,56	41,53	28,34	19,73	12,89	7,47	
		$A/A_{\text{макс}}$	1	0,95	0,65	0,45	0,29	0,17	
<p>Модель 2 Проф.</p> 	$\rho_2 < \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,33	
		$A \%$	19,72	16,62	14,34	10,02	6,48	1,94	
		$A/A_{\text{макс}}$	1	0,84	0,73	0,51	0,33	0,10	
	$\rho_2 \rightarrow \infty$	$A \%$	1,14						
	<p>Модель 3 Проф.</p> 	$\rho_2 < \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	0	0,01	0,03	0,1	0,33	
			$A \%$	26,09	22,10	16,04	8,62	2,57	
$A/A_{\text{макс}}$			1	0,84	0,61	0,33	0,10		
$\rho_2 \rightarrow \infty$		$A \%$	1,51						
<p>Модель 4 Проф.</p> 		$\rho_2 < \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	0	0,01	0,1	0,2	0,33	0,5
			$A \%$	51,2	49,69	38,4	29,26	20,66	12,8
	$A/A_{\text{макс}}$		1	0,97	0,75	0,57	0,40	0,25	
	$\rho_2 > \rho_1$	ρ_2 / ρ_1	∞	100	10	5	3	2	
		$A \%$	25,6	25,22	21,94	18,62	14,63	10,24	
		$A/A_{\text{макс}}$	1	0,98	0,86	0,73	0,57	0,40	

Рис. 2.4. Интенсивность аномалии $A \%$ от эллипсоида в однородном электрическом поле в безграничной среде ($a:b:c=1:0,5:0,1$)

Максимальная аномалия от проводящего эллипсоида наблюдается при ориентировке поля вдоль большой оси объекта при горизонтальном его залегании (см. рис. 2.4, модель 3). В этом случае при $\rho_2=0$ интенсивность аномалии составляет 26,1 %. Но она вдвое меньше, чем аномалия от шара, расположенного на таком же расстоянии от профиля (см. рис. 2.4, модель 4). В случае вертикального залегания эллипсоида при той же, т. е. по оси a , ориентировке поля (модель 2) аномалия уменьшается и при $\rho_2=0$ составляет 19,7 %.

Когда поле направлено по малой оси вертикального проводящего эллипсоида (модель 1), интенсивность аномалии резко уменьшается. Она составляет в этом случае всего 11,3 %. Такая аномалия практически не может быть обнаружена. Подобные объекты могут вызывать более интенсивные аномалии при вертикальной ориентировке поля, которая может быть осуществлена в средней части установок с одинаковой полярностью питающих электродов (однополярные установки).

Аномалии от плохо проводящих объектов при ориентировке поля вдоль их большой оси практически отсутствуют, не достигая в рассматриваемом примере 2 % (модели 2 и 3). При ориентировке поля вдоль малой оси вертикального непроводящего эллипсоида (модель 1) аномалия имеет большую интенсивность (43,5 %), почти вдвое превышая интенсивность аномалии от шара (25,6 %).

Рассмотренный пример позволяет сделать ряд выводов о возможностях электроразведочных установок, в которых используется горизонтально ориентированное поле и о методических приемах, с помощью которых можно добиться увеличения интенсивности аномалий от неизометричных объектов. Для таких установок (симметричной, срединного градиента и др.) наибольший аномальный эффект от хорошо проводящих объектов наблюдается в случае пологого залегания и ориентировки поля в направлении наибольшего размера объекта. При вертикальном залегании таких объектов и ориентировке поля по их простиранию аномалия имеет несколько меньшую интенсив-

ность. Но в обоих случаях интенсивность аномалии меньше, чем от изометричного объекта. Следовательно, наиболее благоприятны при использовании электроразведочных установок с горизонтальной ориентировкой поля изометричные проводящие объекты. Чем больше разница размеров объекта по различным направлениям, тем интенсивность аномалии меньше.

Крутопадающие маломощные проводящие объекты при ориентировке поля вкрест их простираения вряд ли могут быть обнаружены при сколько-нибудь значительной глубине залегания. Такие объекты могут быть выявлены только при вертикальной ориентировке поля или при ориентировке горизонтального поля по направлению простираения объектов.

Маломощные крутопадающие объекты высокого сопротивления при ориентировке поля вкрест их простираения создают интенсивные аномалии, превышающие по интенсивности аномалии от изометричных тел. Интенсивность аномалии возрастает при увеличении разницы размеров объекта по различным направлениям. Такие объекты благоприятны для применения установок с горизонтальной ориентировкой поля.

При ориентировке поля вдоль маломощных, плохо проводящих объектов интенсивность аномалий весьма мала и в этом случае такие объекты не могут быть обнаружены. Практически это означает, что полого залегающие маломощные локальные объекты высокого сопротивления для электроразведки крайне неблагоприятны.

Выводы, полученные при анализе результатов расчета аномалии от эллипсоида, согласуются с выводами, сделанными в разделе 1.10 работы [1] из физических соображений.

Зависимость интенсивности аномалии, вызванной изометричным объектом, в однородном первичном поле определяется коэффициентом

$$p = \frac{1 - \rho_2 / \rho_1}{1 + 2\rho_2 / \rho_1},$$

где ρ_2 и ρ_1 – удельные сопротивления объекта и среды [1, с. 179-180]. Если объект неизометричный, скорость убывания интен-

сивности аномалии при уменьшении разницы удельных сопротивлений зависит от ориентировки поля и соотношения осей объекта. Для проводящего эллипсоида при ориентировке поля вдоль его большой оси при уменьшении отношения сопротивлений интенсивность аномалии убывает заметно быстрее, чем для шара. Так, в рассмотренном примере при $\rho_2/\rho_1=0,1$ интенсивность аномалии составляет 0,33 от максимальной величины при $\rho_2=0$, тогда как для шара $A/A_{\text{макс}}=0,75$ (рис. 2.5). В случае ориентировки поля вдоль малой оси эллипсоида, напротив, при уменьшении разницы сопротивлений интенсивность аномалии убывает медленнее. При ориентировке поля вкрест плохо проводящего эллипсоида ослабление аномалии при уменьшении отношения сопротивлений также происходит быстрее, чем для непроводящего шара.

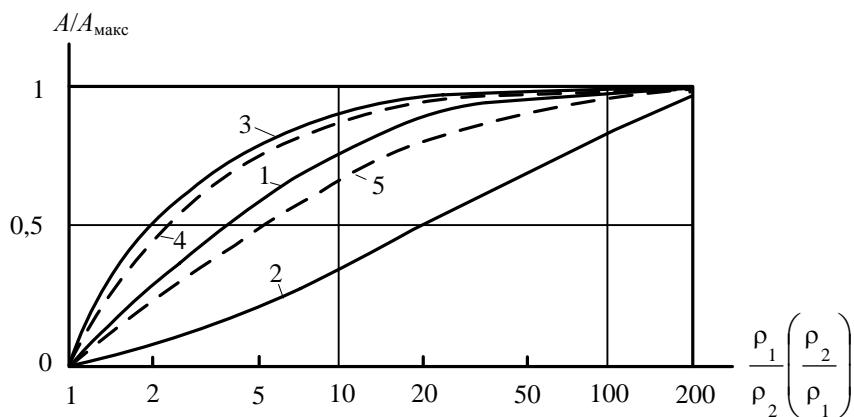


Рис. 2.5. Зависимость интенсивности аномалии от соотношения удельных сопротивлений объекта (ρ_2) и вмещающей среды (ρ_1): сплошные линии для $\rho_2 < \rho_1$, штриховые линии для $\rho_2 > \rho_1$:

1 – проводящий шар; 2 – проводящий эллипсоид, поле по оси a ; 3 – то же, поле по оси c ; 4 – плохо проводящий шар; 5 – плохо проводящий эллипсоид, поле по оси c

Таким образом, в большинстве случаев аномалии от неизометричных объектов при уменьшении разницы в удельных

сопротивлениях убывают быстрее, чем аномалии от шара. Исключение составляет случай ориентировки поля вдоль малой оси проводящего объекта, но при этом интенсивность аномалии невелика.

Приведенный выше анализ аномалий от неизометричных тел позволяет сделать некоторые методические выводы.

Аномалии от неизометричных проводящих тел всегда имеют меньшую интенсивность по сравнению с аномалиями от изометричных объектов сопоставимых размеров, залегающих на такой же глубине до верхней кромки.

При горизонтальной ориентировке первичного поля наибольшая интенсивность аномалий от проводящих неизометричных объектов наблюдается при их горизонтальном залегании и ориентировке поля по направлению наибольшего размера объекта. Но в этом случае по мере уменьшения различия в удельных сопротивлениях объекта и среды интенсивность аномалии убывает быстрее, чем интенсивность аномалии от шара. Поэтому практически такие объекты могут быть обнаружены, если их сопротивление отличается от сопротивления среды в десятки раз.

При ориентировке горизонтального первичного поля вкrest крутопадающих маломощных проводящих объектов аномалия имеет малую интенсивность. Поэтому такие объекты могут быть обнаружены лишь на небольшой глубине. При уменьшении соотношения сопротивлений интенсивность аномалий от таких объектов убывает медленно, и при разнице удельных сопротивлений на порядок аномалия близка к своему максимальному значению при $\rho_2=0$.

Крутопадающие плохо проводящие объекты при ориентировке горизонтального первичного поля по их малой оси вызывают более интенсивные аномалии, чем изометричные тела. При уменьшении соотношения удельных сопротивлений интенсивность аномалии убывает несколько быстрее, чем в случае плохо проводящего шара. Эта зависимость близка к зависимо-

сти $A/A_{\text{макс}}$ от ρ_2/ρ_1 для шара. При ориентировке поля по большой оси маломощных плохо проводящих объектов аномалии имеют весьма малую интенсивность и такие тела практически не могут быть выявлены.

2.7. Электропрофилирование над изометричными проводящими объектами

Чтобы получить представление о виде графиков кажущегося сопротивления при профилировании над трехмерными объектами рассмотрим графики ρ_k над изометричным объектом аппроксимируемым шаром. Графики ρ_k над шаром можно рассчитать, используя первую формулу (2.1), выполнив учет границы раздела земля-воздух. Аномалию от хорошо проводящего шара ($\rho_2 < \rho_1$) можно рассчитать по более простым формулам (2.5) или (2.6). Для получения формы графиков ρ_k над хорошо проводящим шаром можно воспользоваться эквивалентностью аномальной компоненты поля в присутствии шара полю двух разноименных точечных источников (см. рис. 2.2). Форма графиков ρ_k для трехэлектродной установки зависит от соотношения размера установки и глубины до объекта. Поэтому рассмотрим вид графиков для двух значений размера установки $L=AO$.

Пусть шар располагается на глубине $h=1,5a$. Размер установки L равен глубине до центра шара. Если установка располагается левее шара, преобладает поле отрицательного фиктивного источника A' , горизонтальная компонента которого ориентирована одинаково с нормальным полем. Так как приемная линия ориентирована горизонтально по направлению профиля, измеряемая ΔU определяется горизонтальной составляющей аномальной компоненты напряженности поля E_a . Поэтому измеренная разность потенциалов больше, чем в нормальном поле и $\rho_k > \rho_1$ (рис. 2.6, а).

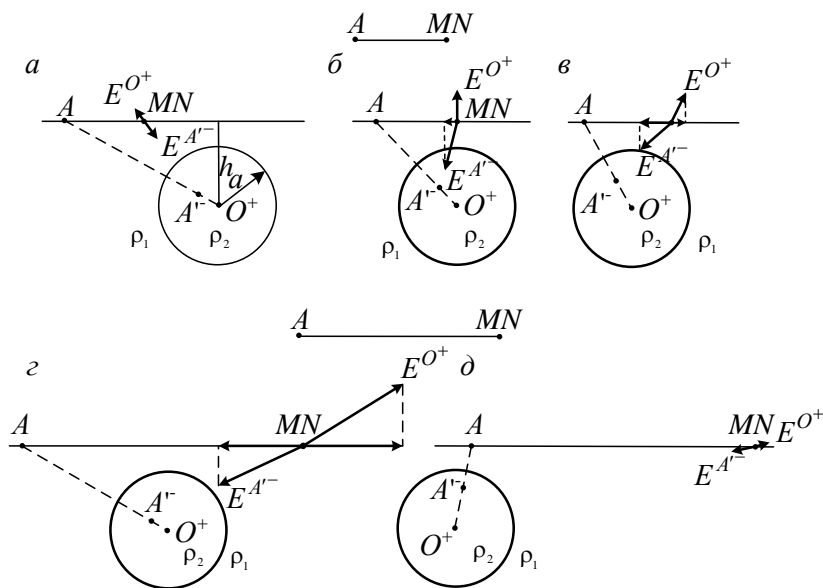


Рис. 2.6. К выводу вида графика ρ_k над хорошо проводящим шаром ($\rho_2 \ll \rho_1$), залегающим на глубине до центра $h=1.5a$:
 а, б, в – размер установки $L=1,5a=h$; г, д – $L=5a=3,3h$ (на рис. г, д масштаб векторов напряженности поля E увеличен в 20 раз)

Когда точка наблюдений располагается над центром шара, существует только горизонтальная составляющая аномальной компоненты напряженности поля, создаваемой отрицательным фиктивным источником. Она ориентирована навстречу первичному полю. Измеряемая разность потенциалов меньше, чем в нормальном поле и $\rho_k < \rho_1$ (см. рис. 2.6, б). Если размер установки не превышает существенно глубину до центра шара, такая же картина наблюдается при расположении объекта между источником и точкой наблюдений.

После перехода источника поля через объект сохраняется преобладание аномальной компоненты, создаваемой отрицательным источником (см. рис. 2.6, в). При удалении от объекта аномалия постепенно убывает не меняя знака. Кажущееся сопротивление остается меньшим ρ_1 , постепенно приближаясь к его значению.

Графики ρ_k для рассматриваемого случая, рассчитанные по формуле (2.6), приведены на рис. 2.7, а.

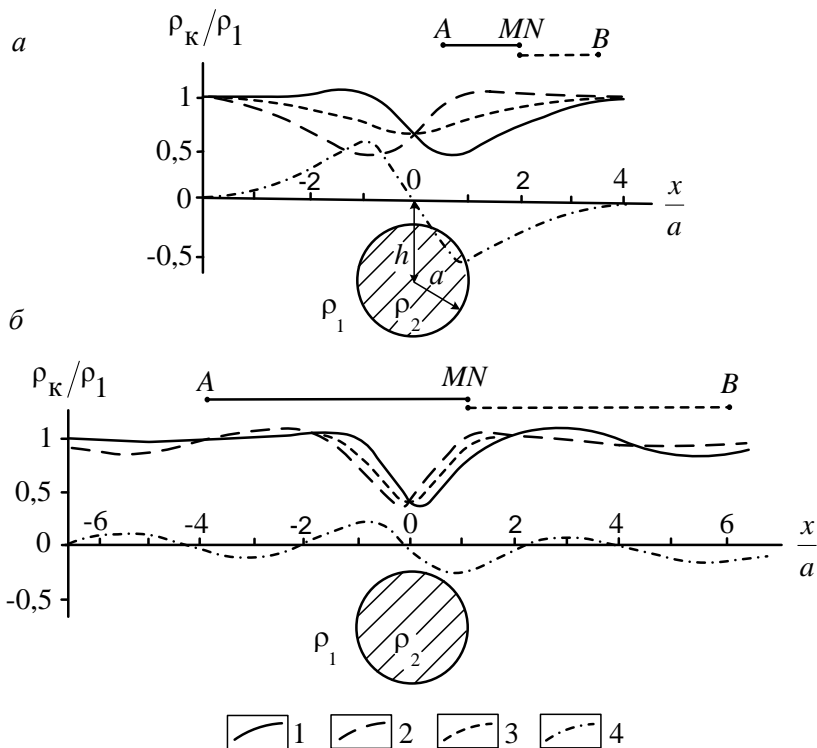


Рис. 2.7. Графики ρ_k над хорошо проводящим шаром ($\rho_2 \ll \rho_1$, $h=1,5a$)
 $a - L=1,5a$; $б - L=5a$:

1 – графики ρ_k установки AMN ; 2 – графики ρ_k установки MNB ; 3 – графики ρ_k симметричной установки A^+MNB^- ; 4 – графики $\Delta\rho_k^{A+MNB^-} = \rho_k^{AMN} - \rho_k^{MNB}$

Если размер установки существенно превышает глубину до объекта форма, графиков ρ_k изменяется. Это происходит из-за отделения экранного эффекта, возникающего при переходе питающего электрода через объект, от основной аномалии. На графике ρ_k^{AMN} эти различия появляются справа от объекта, на графике ρ_k^{MNB} – слева. Рассмотрим поведение ρ_k для размера установки $L=AO=5a$.

Пока приемная линия не перешла через объект поведение кажущегося сопротивления не отличается от предыдущего случая. Когда шар располагается между питающим электродом и приемной линией трехэлектродной установки, в аномальной компоненте преобладает поле положительного фиктивного источника, находящегося в центре шара, так как он ближе к точке наблюдений. Поэтому измеряемая разность потенциалов больше, чем в нормальном поле, а кажущееся сопротивление больше сопротивления вмещающей среды (см. рис. 2.6, *з*).

После перехода питающего электрода через центр объекта начинает преобладать поле отрицательного фиктивного источника, направленное противоположно первичному полю (см. рис. 2.6, *д*). Поэтому измеряемая ΔU меньше, чем в нормальном поле, а кажущееся сопротивление меньше ρ_1 . Графики ρ_k для этого случая приведены на рис. 2.7, *б*.

Заметим, что поведение графиков ρ_k над шаром можно также получить, используя связь между кажущимся сопротивлением и плотностью тока между приемными электродами [1, раздел 5.11].

Рассмотрим графики ρ_k при профилировании над шаром с этих позиций. При приближении к объекту установки AMN , имеющей размер, сопоставимый с глубиной до центра шара, кажущееся сопротивление растет из-за повышения плотности тока на участке MN , вызванного натеканием тока в объект. Затем, когда приемная линия располагается над шаром, оно становится меньше ρ_1 и достигает минимальной величины, когда точка наблюдений находится вблизи правого края объекта. Это вызвано уменьшением плотности тока у поверхности земли из-за его натекания в область объекта. После этого ρ_k растет и по мере удаления установки от объекта приближается к удельному сопротивлению среды (см. рис. 2.7, *а*). График ρ_k встречной установки MNB симметричен графику ρ_k^{AMN} относительно центра шара.

В совокупности оба графика образуют графики ρ_k комбинированного профилирования (КЭП). Над центром объекта

наблюдается прямое пересечение графиков ρ_k встречных установок на несколько пониженном уровне (пересечение называется прямым, когда график ρ_k^{AMN} пересекает другой график сверху вниз). По обе стороны от пересечения наблюдается резкое расхождение графиков.

Кажущееся сопротивление, измеряемое симметричной установкой A^+MNB^- (СЭП), равно среднему арифметическому значению ρ_k , измеряемых встречными трехэлектродными установками в комбинированном профилировании. На графике ρ_k СЭП над объектом наблюдается минимум. В точке минимума значение ρ_k соответствует уровню пересечения графиков ρ_k в КЭП. Интенсивность аномалии в СЭП значительно меньше амплитуды изменения ρ_k в трехэлектродных установках. Это объясняется тем, что размер симметричной установки в рассматриваемом случае значительно меньше оптимального (см. раздел 2.5). В трехэлектродных установках интенсивность аномалии возрастает из-за увеличения плотности тока в области объекта за счет ее вертикальной составляющей.

Фактически, рассматривая соотношение графиков ρ_k КЭП, мы переходим к рассмотрению результатов измерений с однополярной установкой A^+MNB^- . Разность кажущихся сопротивлений, измеренных встречными трехэлектродными установками, равна ΔU , измеренной однополярной установкой и умноженной на коэффициент трехэлектродной установки:

$$\rho_k^{AMN} - \rho_k^{MNB} = K^{AMN} \left(\frac{\Delta U^{AMN}}{I} - \frac{\Delta U^{MNB}}{I} \right) = \Delta \rho_k^{A^+MNB^-}. \quad (2.11)$$

График $\Delta \rho_k$ над объектом переходит через нуль, слева имеет положительный экстремум, справа – отрицательный (см. рис. 2.7).

В средней части однополярной установки ориентировка первичного поля близка к вертикальной. Максимум плотности тока $j_{\max} = j_{z \max}$ располагается на глубине $\frac{2L}{2\sqrt{2}} = \frac{AB}{2\sqrt{2}} \approx \frac{AB}{3}$ (рис. 2.8, а). Для принятого в рассматриваемом примере соот-

ношения размера установки и глубины до шара такая глубина соответствует верхней части объекта и условия формирования аномалии близки к оптимальным (см. рис. 2.8, б). Поэтому аномалия комбинированного профилирования и профилирования с однополярной установкой весьма отчетливая.

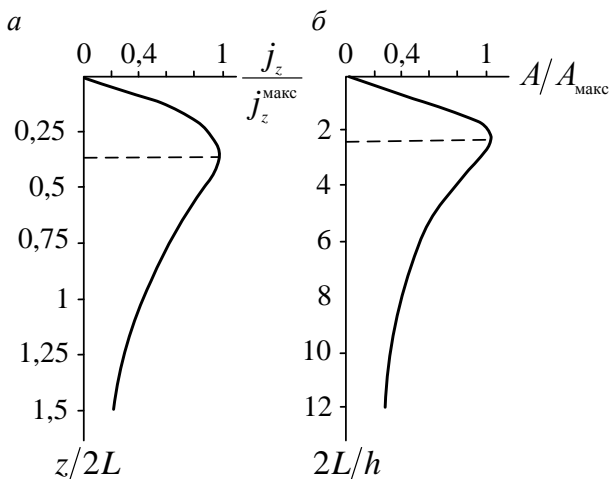


Рис. 2.8. Графики зависимости плотности тока в однополярной установке от глубины (а) и зависимость интенсивности аномалии от размера установки (б):

$2L=AB$ – размер установки; h – глубина до центра объекта

Графики ρ_k при размере трехэлектродных установок, значительно превышающем глубину до объекта, приведены на рис. 2.7, б. В этом случае, когда объект располагается между питающим электродом и приемной линией, кажущееся сопротивление превышает удельное сопротивление среды. Это происходит из-за того, что проводящий шар, как линза, фокусирует поле, и плотность тока на участке линии MN повышается. При дальнейшем перемещении установки, когда питающий электрод и приемная линия располагаются с одной стороны от центра шара, ток натекает в объект, в противоположную от точки наблюдений сторону. Это приводит к уменьшению плотности

тока на участке линии MN и к понижению ρ_k – образуется экраный минимум.

Появление максимумов ρ_k^{AMN} справа от объекта и ρ_k^{MNB} слева приводит к уменьшению ширины отрицательной аномалии. Минимумы ρ_k сближаются. Пересечение графиков ρ_k встречных установок происходит на уровне, близком к минимальному значению кажущегося сопротивления. Интенсивность аномалии для симметричной установки возрастает и мало отличается от интенсивности аномалий для трехэлектродных установок. Это происходит из-за того, что в рассматриваемом случае размер симметричной установки достаточен для получения интенсивности аномалии, близкой к асимптотическому значению (см. раздел 2.5).

Характер графиков ρ_k комбинированного профилирования по сравнению со случаем меньшего размера установки усложняется. Кроме прямого пересечения графиков ρ_k над центром объекта, с каждой стороны от него наблюдается еще два пересечения – обратное, а затем снова прямое. Разница между значениями ρ_k , измеренными встречными установками, из-за сближения минимумов небольшая. Поэтому интенсивность аномалии $\Delta\rho_k^{A^+MNB}$ уменьшается. Форма графиков $\Delta\rho_k$ становится невыразительной – волнообразной с пятью переходами через нуль и шестью экстремумами. Ослабление аномалии в однополярной установке вызвано тем, что максимум плотности тока при большом размере установки смещается вниз и располагается ниже объекта (в рассматриваемом случае глубже его нижней кромки на $0,8a$). Сближение графиков ρ_k^{AMN} и ρ_k^{MNB} приводит к уменьшению четкости аномалии и в КЭП. При малой разнице ρ_k встречных установок случайные флуктуации поля могут замаскировать пересечение графиков или сместить его.

Таким образом, если для получения максимальной аномалии в СЭП размер установки должен быть не меньше определенной величины (см. раздел 2.5), то для установок КЭП и однополярной существует оптимальный размер, отклонение от

которого как в меньшую, так и в большую сторону вызывает уменьшение интенсивности и четкости аномалии.

На рис. 2.9 приведены графики ρ_k на Чернушинском колчеданном месторождении (Красноуральский район).

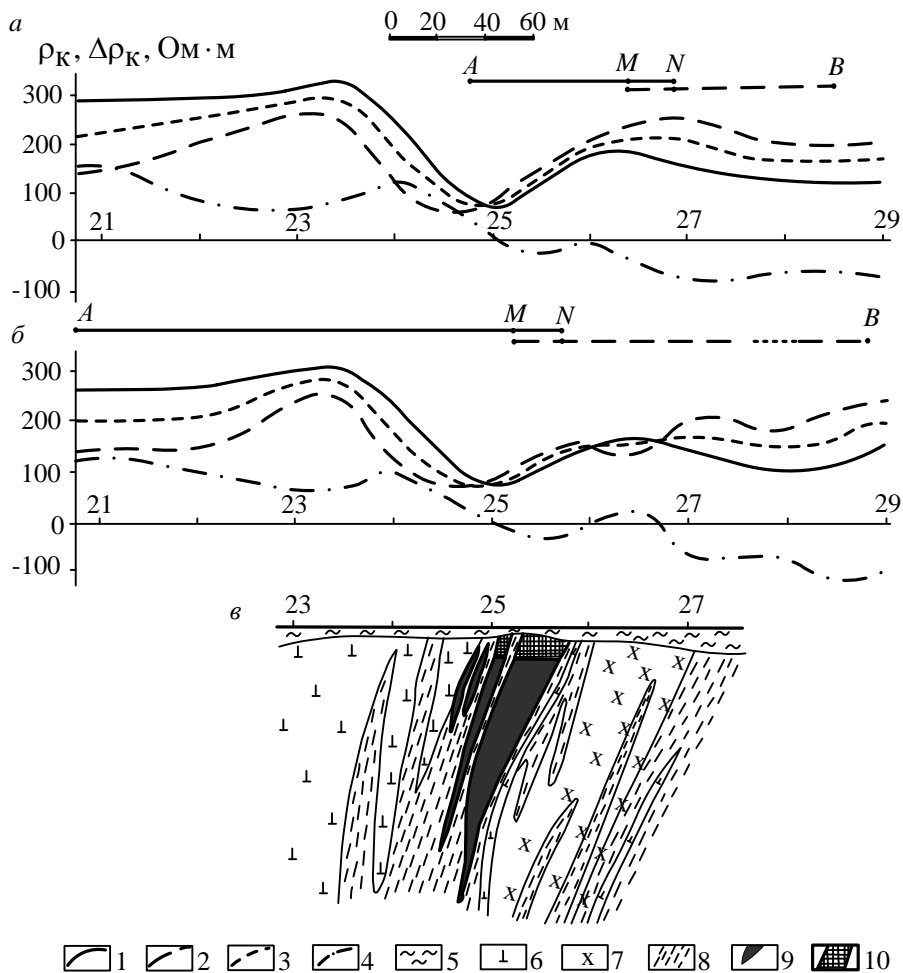


Рис. 2.9. Результаты электропрофилирования на Чернушинском колчеданном месторождении (Средний Урал):
 а – графики ρ_k при $L=AO=75$ м; б – графики ρ_k при $L=AO=200$ м; в – геологический разрез (по В. П. Первову);

1 – графики ρ_k^{AMN} ; 2 – графики ρ_k^{MNB} ; 3 – графики $\rho_k^{A+MNB^+}$; 4 – графики $\Delta\rho_k^{A+MNB^+}$; 5 – рыхлые отложения; 6 – порфириды и их туфы; 7 – дациты; 8 – кварцевосерицитовые сланцы; 9 – массивный колчедан; 10 – железная шляпа

Месторождение представляет собой серию линзовидных тел общей мощностью около 35м, разделенных тонкими прослойками рудовмещающих кварцсерицитовых сланцев. Длина залежи по простиранию и падению порядка 120 – 130 м. Руды, в верхней части окисленные, выходят под маломощные (около 5 м) рыхлые отложения (см. рис. 2.9, в). Так как размеры объекта по разным направлениям различаются всего в три раза, в первом приближении его можно рассматривать как изометричный. Графики ρ_k при профилировании с установками КЭП, СЭП и однополярной получены для $L=AO=OB=75$ м и 200 м.

На графиках ρ_k симметричного профилирования рудная залежь проявляется минимумом, в обоих случаях одинаковой интенсивности (около 70 %). Это закономерно, так как при столь малой глубине залегания объекта меньший размер установки уже обеспечивает получение максимально возможной аномалии (см. рис. 2.9, а, б).

Графики ρ_k комбинированного профилирования при $L=75$ м образуют четкое прямое пересечение в центре аномалии СЭП (см. рис. 2.9, а). Интенсивность аномалии для установки AMN больше, чем для MNB – 96 % и 69 % соответственно. Среднее значение интенсивности аномалии 82 % (для каждой трехэлектродной установки интенсивность аномалии определялась как отношение разности $\rho_{k \text{ макс}}$ и $\rho_{k \text{ мин}}$ к их среднему значению). Асимметрия аномалии объясняется разными фоновыми значениями ρ_k слева и справа от залежи. Этим же объясняется и асимметрия аномалии СЭП.

На графике $\Delta\rho_k$ однополярной установки залежь отмечается переходом через нуль и четкими экстремумами разного знака слева и справа от него. Максимум плотности тока в этой установке располагается на глубине примерно 50 м, т. е. в центре залежи.

При $L=200$ м на графиках ρ_k КЭП также наблюдается отчетливое прямое пересечение, но к востоку от него график для

установки AMN пересекает другой график и ρ_k^{AMN} становится больше, чем ρ_k^{MNB} , а затем, после еще одного прямого пересечения, снова опускается ниже графика ρ_k^{MNB} (см. рис. 2.9, *в*). Таким образом, в восточной своей части графики ρ_k комбинированного профилирования аналогичны теоретическим при $L=5h$ (см. рис. 2.7, *б*). В западной части профиля из-за каких-то влияний этот эффект не наблюдается. Скорей всего он замаскирован аномалией от контакта между порфиритами и сланцами в районе пикетов 23-24.

Интенсивность аномалии КЭП по сравнению со случаем, когда $L=75$ м, уменьшается и составляет 65 %, т. е. близка к наблюдаемой в СЭП. Это объясняется тем, что максимум вертикальной компоненты плотности тока при $L=200$ м опускается на глубину примерно 130 м и располагается несколько глубже нижней выклинки залежи. На амплитуду графика $\Delta\rho_k$ это заметного влияния не оказало.

Таким образом, рассмотренный практический пример удовлетворительно согласуется с результатами теоретических оценок аномалий ρ_k при профилировании над локальным проводящим объектом установками различных типов.

2.8. Профилирование над линзовидными проводящими объектами

При профилировании над маломощными крутопадающими проводящими объектами характер графиков ρ_k КЭП и $\Delta\rho_k$ однополярной установки сохраняется. Это видно на рис. 2.10, где приведены графики ρ_k над вертикальным проводящим диском. По сравнению с профилированием над шаром (см. рис. 2.7, *а*) аномалия над диском для этих установок имеет почти вдвое меньшую интенсивность и несколько большую ширину. На графике ρ_k симметричной установки наблюдается понижение интенсивностью около 10 % на участке профиля, немного превышающем разнос AB . Над самим диском появляется локальное повышение кажущегося сопротивления до уровня фона. Прак-

тически подобная аномалия выявлена быть не может. По мере увеличения разноса AB интенсивность максимума уменьшается и при больших размерах установки, когда поле приближается к однородному, над маломощным крутопадающим проводящим объектом наблюдается слабая отрицательная аномалия (см. раздел 2.6).

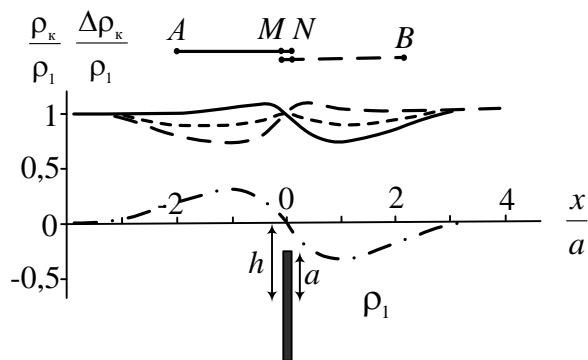


Рис. 2.10. Графики ρ_k над проводящим вертикальным диском ($h=1,5a; L=2a$)

Практический пример профилирования над подобным объектом приведен на рис. 2.11. На графиках ρ_k комбинированного профилирования рудное тело, как и в теоретическом примере диска, отмечается прямым пересечением (см. рис. 2.11, а). Прямому пересечению графиков ρ_k КЭП соответствует переход через нуль графика $\Delta\rho_k$ однополярной установки (см. рис. 2.11, б). Западные и восточные аномалии от рудного тела на всех графиках отмечаются контактами более проводящих рудовмещающих пород с менее измененными и потому более высокоомными порфиритами. Западный контакт на всех графиках отмечается очень четко. Над восточным контактом графики ρ_k и $\Delta\rho_k$ плавные, что, по-видимому, связано с постепенным изменением сопротивления пород (градиентная среда). Влияние кон-

тактов несколько искажает краевые части аномалии от рудного тела.

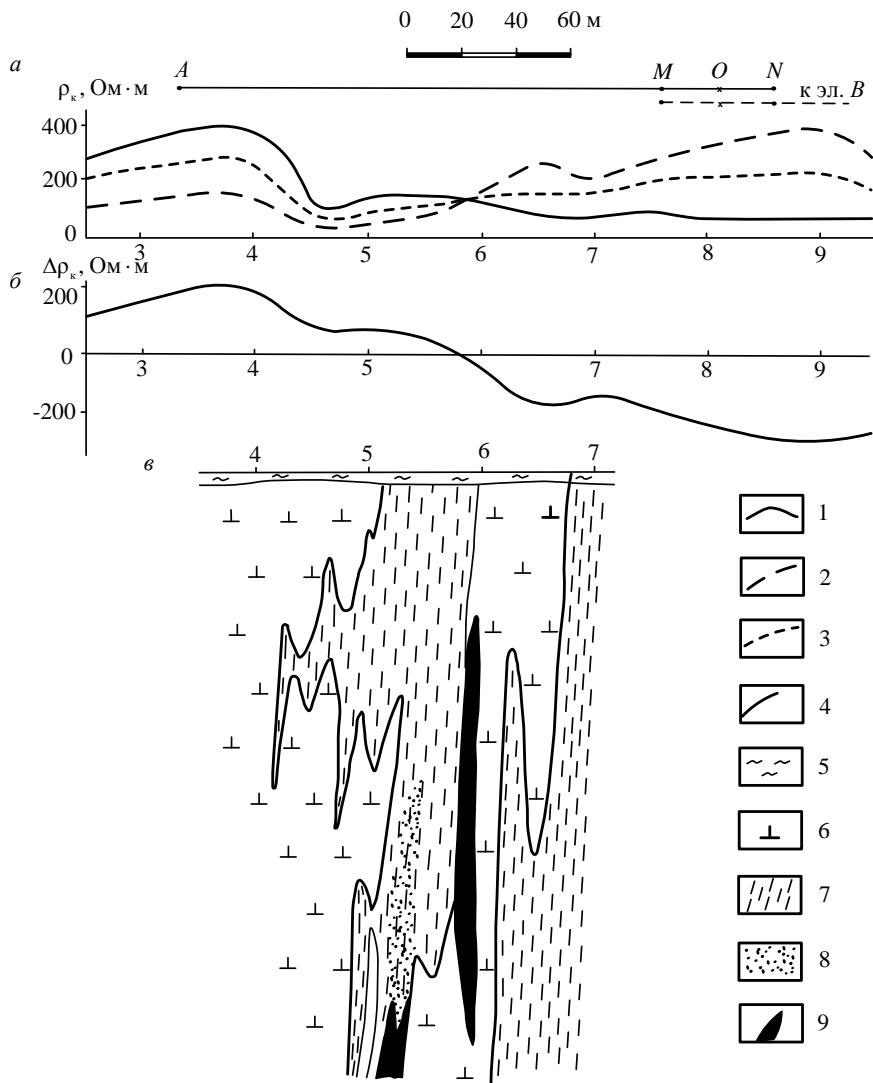


Рис. 2.11. Результаты электропрофилирования на Айвинском месторождении (Средний Урал):

a – графики ρ_k при $AO=OB=200$ м; *б* – графики $\Delta\rho_k$; *в* – геологический разрез по В. П. Первову;

1 – графики ρ_k^{AMN} ; 2 – графики ρ_k^{MNB} ; 3 – графики $\rho_k^{A+MNB^+}$; 4 – график $\Delta\rho_k^{A+MNB^+}$; 5 – рыхлые отложения; 6 – порфириты; 7 – кварцевосерицитовые сланцы; 8 – вкрапленность сульфидов; 9 – массивный колчедан

На графике ρ_k симметричного профилирования рудное тело не отмечается. По этому графику устанавливаются только контакты проводящей рудовмещающей зоны (см. рис. 2.11, а).

Рассмотренный пример показывает, что при поисках маломощных крутопадающих проводящих объектов установка комбинированного профилирования и однополярная установка достаточно эффективны, тогда как установки с горизонтальной ориентировкой первичного поля – симметричная и срединного градиента – не могут дать хороших результатов.

В случае горизонтального залегания маломощных проводящих тел характер аномалии меняется. Графики ρ_k над горизонтальным проводящим диском приведены на рис. 2.12. При приближении установки AMN к диску, так как питающий электрод A находится далеко, натекание тока в диск незначительно и ρ_k остается практически равным удельному сопротивлению вмещающей среды. Когда приемная линия перемещается над объектом, наблюдается понижение ρ_k , достигающее максимальной амплитуды над правой половиной диска. Это понижение вызвано уменьшением плотности тока в области расположения линии MN из-за натекания тока в объект. После перехода приемной линии через объект плотность тока на участке MN повышается вследствие стекания тока с правого края диска, и наблюдается резкое повышение ρ_k . При дальнейшем перемещении установки, когда питающий электрод располагается над объектом, наблюдается широкий экранный минимум. График ρ_k установки MNB симметричен графику ρ_k^{AMN} относительно центра диска (см. рис. 2.12, б).

Волнообразный характер графиков ρ_k трехэлектродных установок приводит к сложному виду аномалии КЭП. Искажения графиков ρ_k наблюдаются на интервале профиля примерно втрое превышающем размер трехэлектродной установки. На этом интервале графики образуют пять пересечений – три прямых и два обратных. Слабо выраженное прямое пересечение

располагается над центром объекта, два более отчетливых – справа и слева от диска. Между прямыми пересечениями графиков ρ_k наблюдаются обратные пересечения. В целом картина аномалии сложная и выделение объекта затруднительно. Еще более невыразителен график $\Delta\rho_k$ однополярной установки (см. рис. 2.12, б).

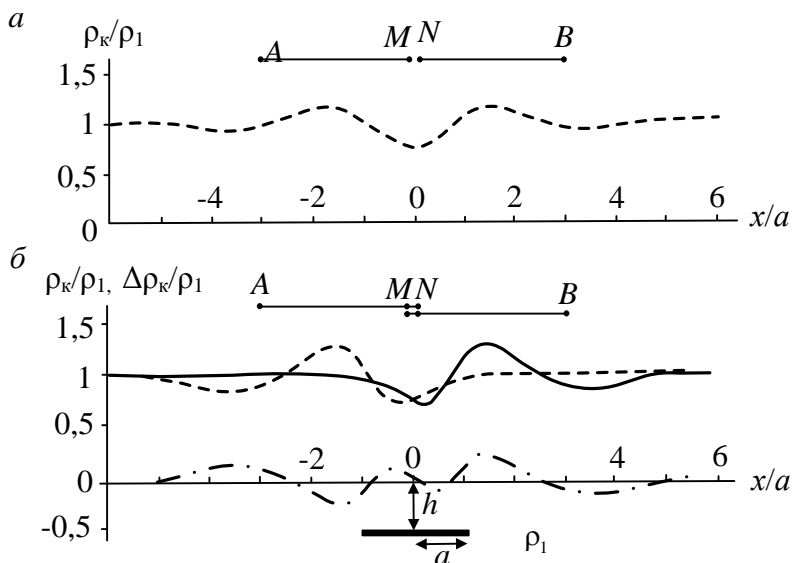


Рис. 2.12. Графики ρ_k над проводящим горизонтальным диском ($h=1,5a$; $L=3a$)

Поведение графиков ρ_k комбинированного профилирования может несколько меняться в зависимости от соотношения размера и глубины залегания объекта и размера установки. При определенном соотношении этих параметров центральное прямое пересечение графиков может исчезнуть, а два обратных пересечения слиться в одно.

В симметричном профилировании над горизонтальным проводящим диском наблюдается отчетливое понижение кажу-

щегося сопротивления, подчеркнутое максимумами ρ_k по обе его стороны (см. рис. 2.12, *a*).

Таким образом, в случае пологого залегания маломощных проводящих объектов наиболее эффективны установки с горизонтальной ориентировкой первичного поля – симметричная и срединного градиента. В установке КЭП и в однополярной установке аномалии имеют сложный, трудно поддающийся интерпретации, вид. Поэтому применение установок КЭП и A^+MNB^+ при поисках таких объектов нецелесообразно.

При наклонном залегании маломощного проводящего объекта аномалия имеет промежуточный характер между крайними случаями вертикального и горизонтального его залегания. При этом аномалия становится асимметричной.

2.9. Профилирование над плохо проводящими объектами

Над плохо проводящими телами аномалии имеют противоположный, по отношению к аномалиям от проводящих объектов, знак. Интенсивность аномалий при этом уменьшается. На рис. 2.13, *б* приведены графики ρ_k КЭП над непроводящим шаром. Сравнивая их с графиками ρ_k над аналогичным проводящим объектом (см. рис. 2.7, *a*), можно видеть, что графики поменялись местами и образуют над шаром обратное пересечение на повышенном относительно ρ_1 уровне. Амплитуда аномалии уменьшилась более чем вдвое. Разница ρ_k встречных установок невелика и составляет около 12 % от ρ_1 . Соответственно мала и амплитуда аномалии $\Delta\rho_k$ однополярной установки.

В симметричной установке над непроводящим шаром наблюдается широкая положительная аномалия с амплитудой 12,4 % (см. рис. 2.13, *a*). Амплитуда аномалии увеличивается при увеличении размера установки, достигая максимальной величины 28,8 % в случае однородного первичного поля, т. е. при $AB \rightarrow \infty$. При этом ширина аномалии уменьшается, и по обе стороны от максимума ρ_k наблюдаются подчеркивающие его минимумы. Амплитуда аномалии от проводящего шара, располо-

женного на той же глубине в однородном первичном поле, в два раза больше.

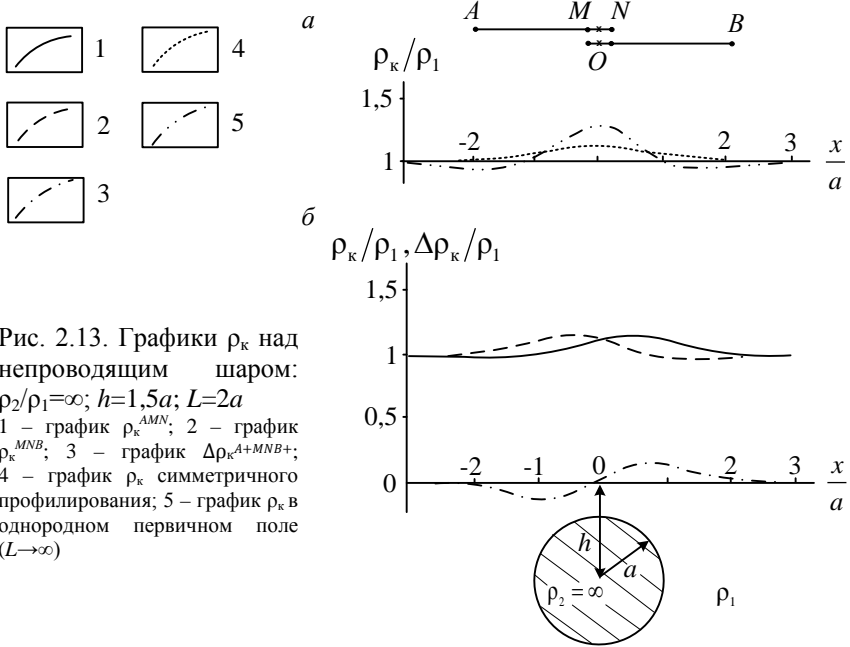


Рис. 2.13. Графики ρ_k над непроводящим шаром: $\rho_2/\rho_1 = \infty$; $h = 1,5a$; $L = 2a$
 1 – график ρ_k^{AMN} ; 2 – график ρ_k^{MNB} ; 3 – график $\Delta\rho_k^{A+MNB+}$; 4 – график ρ_k симметричного профилирования; 5 – график ρ_k в однородном первичном поле ($L \rightarrow \infty$)

Рассмотренный пример позволяет сделать вывод, что при поисках плохопроводящих изометричных объектов установка КЭП и однополярная установка неэффективны. Лучшие результаты могут дать установки с горизонтально ориентированным первичным полем – СЭП с большими разносами AB или метод срединного градиента.

Крутопадающие плохопроводящие объекты в установках с горизонтальной ориентировкой первичного поля вызывают более интенсивные аномалии, чем изометричные тела. В рассмотренном в разделе 2.6 примере амплитуда аномалии от эллипсоида с отношением осей 10:1 при ориентировке поля вкрест объекта в 1,7 раза больше, чем интенсивность аномалии от шара (см. рис. 2.4). В трехэлектродной установке крутопадающий плохопроводящий объект также создает более интенсивную

аномалию, чем шар, так как оказывает более сильное экранирующее действие на электрическое поле.

Практический пример аномалии над крутопадающим непроводящим объектом приведен на рис. 2.14. Над кварцевой жилой наблюдается интенсивная аномалия симметричного профилирования. Интенсивный максимум ρ_k подчеркивается расположенными по обе стороны от него минимумами (см. рис. 2.14, а). Примерно такой же интенсивности максимумами жила отмечается на графиках ρ_k обеих трехэлектродных установок (см. рис. 2.14, б). Но пересечение графиков КЭП смещено относительно максимумов ρ_k в сторону падения жилы.

Пологозалегающие маломощные плохо проводящие объекты во всех установках вызывают слабые аномалии и их выявление представляет большие трудности.

На основании приведенного анализа аномалий над плохо проводящими локальными объектами можно сделать вывод, что для их поисков наиболее целесообразно применение установок СЭП и срединного градиента.

2.10. Графики ρ_k над приповерхностными неоднородностями

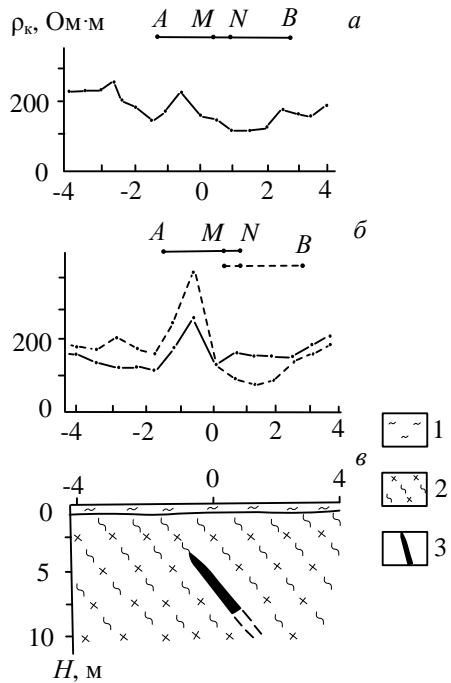


Рис. 2.14. Графики ρ_k симметричного (а) и комбинированного (б) профилирования над кварцевой жилой (по С. Н. Кондрашеву):

1 – почвенный слой; 2 – кварцевослюдистые сланцы; 3 – кварцевая жила

В практике электроразведки, особенно в рудных районах, часто встречаются случаи, когда локальный объект располагается на очень малой глубине или даже выходит на поверхность земли. Такими объектами могут быть локальные участки увеличения мощности или электропроводности рыхлых отложений или коры выветривания, близповерхностные карстовые полости и т. п. Чаще всего такие объекты являются причинами геоэлектрических помех, осложняющих выделение аномалий от объектов поисков. В других случаях они могут сами быть объектами изучения – например, при поисках месторождений, связанных с корами выветривания или россыпных месторождений.

В качестве модели приповерхностного локального объекта удобно принять полушар, плоская поверхность которого совпадает с поверхностью земли. В этом случае задача сводится к задаче об аномалии от шара в безграничном пространстве и расчет поля может быть выполнен по формулам (2.1). Надо лишь учесть влияние границы раздела "земля-воздух" на нормальную компоненту поля.

Особенностью аномалий от приповерхностных неоднородностей в комбинированном профилировании и в профилировании с однополярной установкой является зависимость вида графиков ρ_k от соотношения между горизонтальным размером объекта и размером приемной линии. Графики ρ_k над проводящим полушаром, когда разнос MN меньше поперечника объекта, приведены на рис. 2.15. При приближении установки AMN к объекту, плотность тока на участке MN увеличивается и кажущееся сопротивление растет, достигая максимума, когда электрод N находится на левом крае полушара. При входе линии MN в объект ρ_k резко уменьшается из-за уменьшения ρ_{MN} (см. рис. 2.15, б). По мере перемещения линии MN внутри полушара натекание тока в объект усиливается и j_{MN} растет (источник A приближается к объекту). Это вызывает небольшой рост ρ_k при приближении к правому краю полушара. При выходе линии MN из объекта ρ_k резко увеличивается из-за увеличения ρ_{MN} . Кроме того, когда объект располагается между питающим электродом

и приемной линией, он действует как линза, фокусируя поле и увеличивая плотность тока на участке MN . Поэтому максимум ρ_k , когда электрод M стоит на правом крае полушара, имеет большую интенсивность. При дальнейшем перемещении установки плотность тока j_{MN} из-за эффекта линзы остается повышенной и ρ_k больше ρ_1 . При переходе через объект питающего электрода натекание тока в сторону линии MN уменьшается, и когда электрод A располагается в правой части объекта, ток натекает в противоположном от приемной линии направлении. На графике ρ_k^{AMN} наблюдается экранный минимум (пикет 6 на рис. 2.15, б). График ρ_k^{MNB} симметричен графику ρ_k^{AMN} относительно центра полушара.

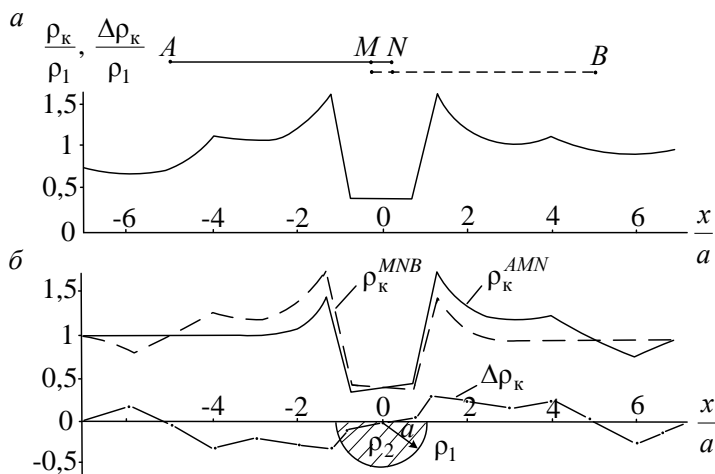


Рис. 2.15. Графики ρ_k над проводящим полушаром ($\rho_2=0,2 \rho_1$):
 а – график ρ_k симметричного профилирования; б – графики ρ_k комбинационного профилирования и $\Delta\rho_k$. $L=5a$, $MN=0,5a$

Описанное поведение графиков ρ_k при перемещении линии MN внутри полушара приводит к тому, что над объектом наблюдается обратное пересечение графиков ρ_k КЭП, характерное для плохо проводящих объектов. О том, что объект проводящий, можно судить только по понижению ρ_k для обеих установок. Прямые пересечения графиков ρ_k КЭП наблюдающиеся

по обе стороны от объекта на расстоянии L от него – это экран-ные эффекты.

График $\Delta\rho_k$ для однополярной установки над объектом изменяет знак с отрицательного на положительный (см. рис. 2.15, б). По обе стороны от объекта на расстоянии L от него наблюдаются переходы через нуль в обратном направлении. Очевидно, установить, что объект, вызвавший аномалию, имеет пониженное сопротивление, по этому графику трудно.

В симметричном профилировании над полушаром наблюдается четкая аномалия в виде минимума ρ_k . По обе стороны от минимума наблюдаются максимумы. Если эти максимумы отчетливо выражены, по ним можно судить о малой глубине залегания объекта.

Практический пример графиков ρ_k над широким по сравнению с размером линии MN карманом рыхлых отложений приведен на рис. 2.16.

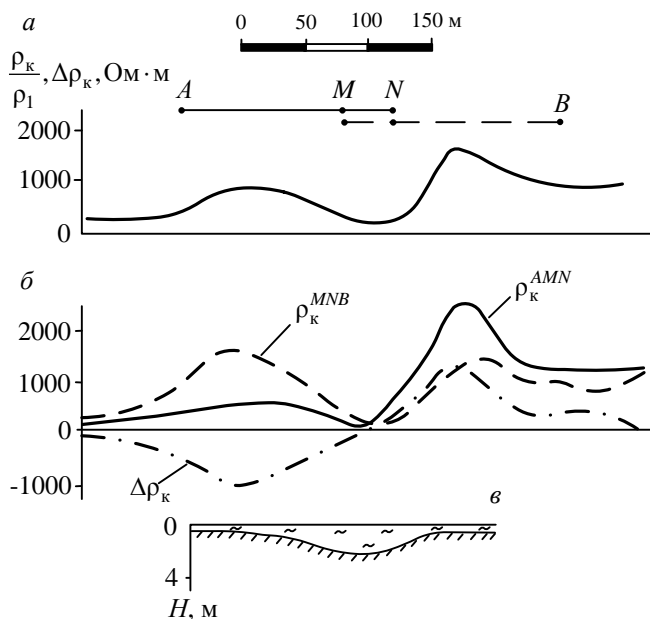


Рис. 2.16. Графики ρ_k над широким (больше разноса MN) карманом рыхлых отложений (по Б. В. Тарасюку):

a – график ρ_k симметричного профилирования; *б* – графики ρ_k комбинированного профилирования и $\Delta\rho_k$ однополярной установки; *в* – геологический разрез

Сравнивая эти графики с рассмотренным теоретическим примером, можно видеть одинаковый их характер в обоих случаях. Только на практических графиках не выражены экранные эффекты, что можно объяснить влиянием других геоэлектрических неоднородностей.

Расчетные графики ρ_k над проводящим полушаром, диаметр которого меньше размера приемной линии, показаны на рис. 2.17. По сравнению с предыдущим случаем изменилось поведение графиков непосредственно над объектом – над его центром вместо обратного пересечения графиков ρ_k^{AMN} и ρ_k^{MNB} появилось прямое пересечение на уровне, несколько меньшем удельного сопротивления вмещающей среды. Два обратных пересечения образовались по сторонам от полушара (рис. 2.17, *б*). Понижение ρ_k^{AMN} при перемещении установки, когда объект располагается между приемными электродами, можно объяснить тем, что при этом относительное изменение расстояния до источника тока ввиду малых, по сравнению с L размеров полушара невелико. Поэтому заметного увеличения натекания тока в объект не происходит. Но в правой части полушара перед его контактом с менее проводящей вмещающей средой плотность тока уменьшается из-за его рассеивания. Это приводит к уменьшению j_{MN} и ρ_k . График ρ_k^{MNB} симметричен графику ρ_k^{AMN} относительно центра объекта.

График $\Delta\rho_k$ однополярной установки имеет сложный пилообразный характер (см. рис. 2.17, *б*). Амплитуда колебаний $\Delta\rho_k$ небольшая, так как невелико различие между ρ_k встречных установок в КЭП.

На графике ρ_k симметричного профилирования объект отмечается достаточно четким минимумом (см. рис. 2.17, *а*). Амплитуда аномалии меньше, чем в случае, когда размер линии MN меньше поперечника объекта (при расположении линии MN

над объектом она захватывает и максимумы ρ_k , расположенные, по обе стороны от минимума).

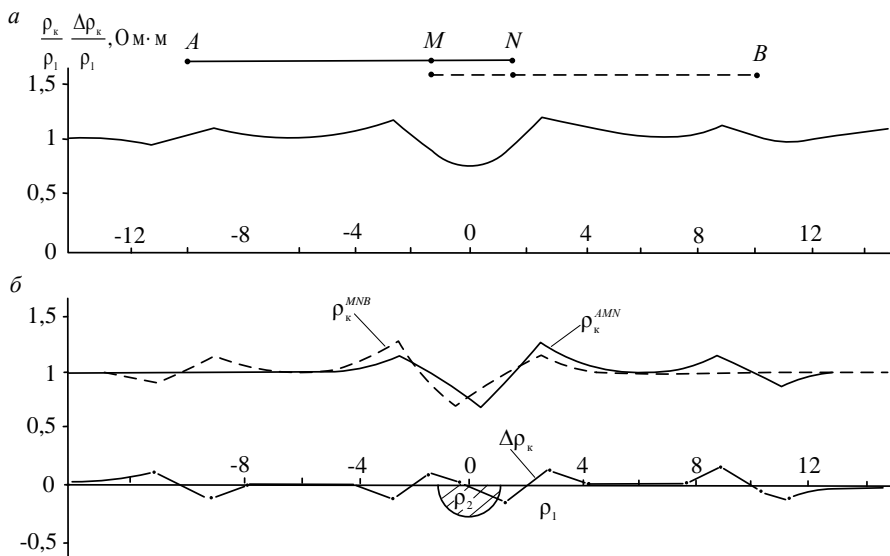


Рис. 2.17. Графики ρ_k над проводящим полушаром ($\rho_2=0,2 \rho_1$):
 а – график ρ_k симметричного профилирования; б – графики ρ_k комбинированного профилирования и $\Delta \rho_k$. $L=10a$, $MN=3a$ (а – радиус полушара)

В целом графики ρ_k над проводящей приповерхностной неоднородностью с поперечником меньшего размера линии MN мало отличаются от графиков ρ_k над маломощным глубинным горизонтально залегающим объектом (сравните рис. 2.17 и 2.12).

На рис. 2.18 показаны графики ρ_k над карманом рыхлых отложений, ширина которого меньше размера приемной линии. Над объектом, как и в теоретическом примере, наблюдается прямое пересечение графиков ρ_k комбинированного профилирования (см. рис. 2.18, б). В других частях профиля графики несколько отличаются от теоретических. По-видимому, это связано со сложной конфигурацией области повышенной мощности

рыхлых отложений – по сторонам от узкого глубокого кармана наносов наблюдается увеличение глубины до коренных пород меньшей амплитуды. Кроме того могли сказаться сложное строение подстилающей среды и рельеф земной поверхности.

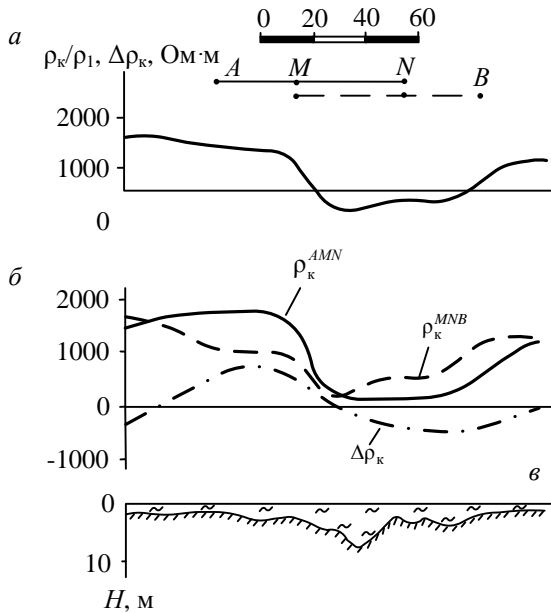


Рис. 2.18. Графики ρ_k над узким (меньше разнота MN) карманом рыхлых отложений (по Б. В. Тарасюку):
 а – график ρ_k симметричного профилирования; б – графики ρ_k комбинированного профилирования и $\Delta \rho_k$ однополярной установки; в – геологический разрез

В симметричном профилировании наблюдается широкий минимум ρ_k , на фоне которого небольшим локальным понижением отмечается узкий карман наносов (см. рис. 18, а)

В целом аномалия по виду не отличается от аномалии, вызываемой проводящим объектом глубинного характера.

Если приповерхностный локальный объект имеет повышенное удельное сопротивление, форма графиков ρ_k аналогична форме графиков над проводящей неоднородностью, но анома-

лия имеет противоположный знак. Представление о характере аномалии над плохо проводящим приповерхностным объектом дают графики ρ_k над полушаром, приведенные на рис. 2.19. В этом примере размер линии MN меньше диаметра полушара и графики ρ_k являются зеркальным отражением графиков ρ_k , приведенных на рис. 2.15 для такого же, но проводящего объекта. Над объектом наблюдается прямое пересечение графиков ρ_k КЭП на повышенном, по сравнению с фоном, уровне. График $\Delta\rho_k$ над центром объекта меняет знак с положительного на отрицательный (см. рис. 2.19, б). Такую аномалию $\Delta\rho_k$ вряд ли можно отличить от аномалии, вызванной глубинным проводящим объектом. В симметричном профилировании полушар отмечается четким максимумом ρ_k , но интенсивность аномалии меньше, чем в случае проводящего объекта (см. рис. 2.19, а и 2.15, а).

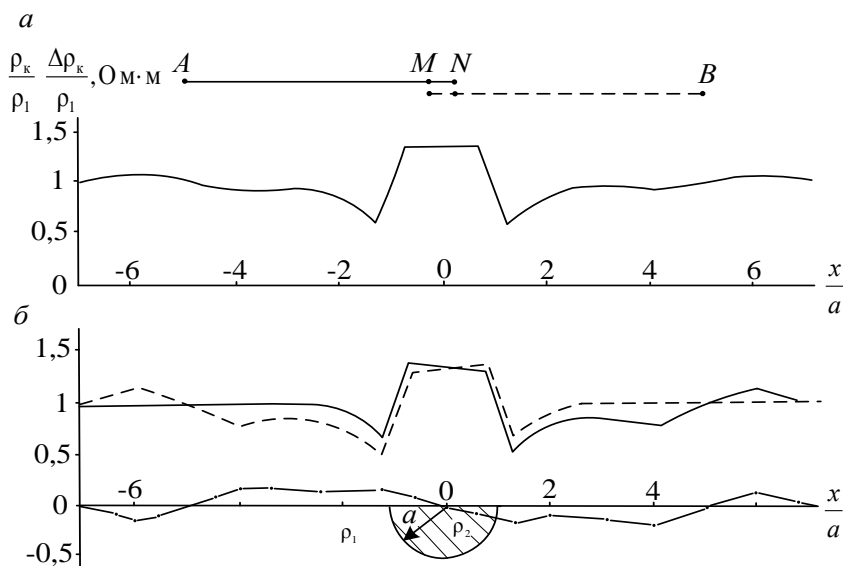


Рис. 2.19. Графики ρ_k над плохо проводящим полушаром ($\rho_2=5 \rho_1$):
 а – график ρ_k симметричного профилирования; б – графики ρ_k комбинированного профилирования и $\Delta\rho_k$ однополярной установки. $L=5a, MN=0,5a$

Таким образом, приповерхностные неоднородности вызывают аномалии во всех модификациях электропрофилеирования. Часто эти аномалии трудно отличить от аномалий, вызванных объектами на глубине. Среди всех модификаций наибольшими классификационными возможностями обладает комбинированное профилирование.

2.11. Характеристика модификаций электропрофилеирования применительно к поискам локальных объектов

В предыдущих разделах были рассмотрены аномалии от различных типов локальных объектов в симметричном и комбинированном профилировании, а также в профилировании с однополярной установкой. Из часто применяющихся модификаций профилирования не рассматривались дипольное профилирование и метод срединного градиента. В установке срединного градиента аномалии отличаются от аномалий в симметричном профилировании только отсутствием экранных эффектов. Поэтому все выводы, касающиеся аномалий СЭП, справедливы и для установки СГ. При достаточно больших размерах установки аномалии в методе срединного градиента не отличаются от аномалий в однородном первичном поле, которые подробно описаны в работе [1], разделы 5.6 и 5.7.

Вид аномалий дипольного профилирования в области расположения объекта не отличается от вида аномалий КЭП. Различия наблюдаются в краевых частях аномального участка. Они заключаются в более сложном характере и большей интенсивности экранных эффектов. Поэтому к ДЭП можно отнести все выводы, сделанные по отношению к КЭП. Надо только учитывать, что глубинность дипольной установки несколько меньше глубины исследования такой же по размеру трехэлектродной установки.

Обобщая результаты анализа аномалий, вызываемых локальными объектами, можно сформулировать некоторые выводы о возможностях различных модификаций метода.

- В симметричном профилировании минимумами кажущегося сопротивления выделяются изометричные проводящие объекты и полого залегающие линзовидные тела. Аналогичные аномалии вызывают приповерхностные проводящие неоднородности. Разделение аномалий от глубинных и приповерхностных объектов обычно затруднено. Указанием на малую глубину залегания объекта могут служить максимумы ρ_k по обе стороны минимума, когда они хорошо выражены. При благоприятных условиях классификация аномалий по глубине залегания вызвавших их объектов может быть выполнена по результатам двух- или трехразносного СЭП. Крутопадающие проводящие маломощные линзовидные объекты для поисков СЭП неблагоприятны. Для успешного применения метода размер установки должен быть достаточным для получения интенсивности аномалии, близкой к асимптотическому значению (см. раздел 2.5).

- Крутопадающие линзовидные объекты высокого сопротивления в СЭП выделяются четкими максимумами ρ_k . При поисках таких объектов эта модификация является предпочтительной. Изометричные плохо проводящие тела также выявляются симметричным профилированием, но интенсивность аномалий от них значительно меньше, чем от проводящих объектов. Для получения лучшего эффекта от таких объектов первичное поле следует создавать близким к однородному, т. е. применять установки больших размеров.

- Для поисков проводящих крутопадающих и изометричных объектов наиболее подходящим является комбинированное профилирование. Над такими объектами наблюдается четкое прямое пересечение графиков ρ_k . Для получения хороших результатов размер установки не должен сильно отличаться от оптимального. Аномалии от проводящих приповерхностных неоднородностей с поперечником большим размера линии MN

отличаются от аномалий, вызванных глубинными объектами по обратному пересечению графиков ρ_k на резко пониженном фоне. Сложнее отбраковываются аномалии от приповерхностных неоднородностей с малыми горизонтальными размерами. Пологозалегающие маломощные проводящие тела выявляются значительно хуже. Заметим, что при обработке результатов КЭП может быть получена дополнительная информация путем вычисления ρ_k СЭП и $\Delta\rho_k$ однополярной установки.

- Плохо проводящие пологозалегающие тела небольшой мощности комбинированным профилированием, как и СЭП, выделяются плохо. При поисках изометричных и крутопадающих объектов повышенного сопротивления КЭП не имеет преимуществ по сравнению с СЭП и СГ, а по экономическим показателям проигрывает этим методам.

- При профилировании с однополярной установкой вид графиков ρ_k и амплитуда аномалий определяются соотношением ρ_k встречных трехэлектродных установок КЭП. Но в этой установке теряется часть информации из-за отсутствия абсолютных значений ρ_k . Поэтому целесообразнее выполнять измерения с установкой комбинированного профилирования, а $\Delta\rho_k$ при необходимости вычислять в процессе обработки результатов. Графики $\Delta\rho_k$ следует строить дополнительно к графикам ρ_k КЭП в случае значительных колебаний уровня кажущегося сопротивления. Графики $\Delta\rho_k$ имеют более спокойный характер и по ним легче выделять аномалии, особенно малоинтенсивные. При площадной съемке может быть построен план изолиний $\Delta\rho_k$, на котором отражается общая геоэлектрическая картина. Такие планы целесообразно рассматривать вместе с планами изом ρ_k СЭП, который также может быть построен по результатам КЭП.

2.12. Электрическое зондирование с симметричной установкой (ВЭЗ) над локальными объектами в однородной среде

Чтобы получить представление о виде кривых зондирования над локальным объектом можно воспользоваться простейшей моделью – шаром. Для этого случая расчет ρ_k при любом соотношении удельных сопротивлений объекта и вмещающей среды ρ_2/ρ_1 может быть выполнен по формулам (2.1). Асимптотические значения ρ_k при малых и больших размерах питающей линии можно определить из физических соображений. Очевидно, при $AB \ll h$ (h – глубина до центра шара) объект не оказывает влияния на поведение электрического поля и $\rho_{k\text{ ac}} \rightarrow \rho_1$. Когда размер питающей линии намного превышает размеры объекта и глубину его залегания, первичное поле становится практически однородным и над центром объекта при малых размерах приемной линии

$$\rho_{k\text{ ac}} \rightarrow \rho_1 \left(1 - 2 \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2} \frac{a^3}{h^3} \right). \quad (2.12)$$

Если точка зондирования смещена относительно объекта перпендикулярно установке, в этой формуле надо глубину до центра шара заменить на расстояние между центром объекта и точкой зондирования. При увеличении размеров установки в процессе зондирования ρ_k монотонно изменяется от ρ_1 до $\rho_{k\text{ ac}}$ и по виду кривая ВЭЗ похожа на двухслойную.

Теоретическая кривая зондирования над проводящим шаром приведена на рис. 2.20, а. Если $\rho_2 > \rho_1$, кажущееся сопротивление при увеличении разнесов AB растет, и качественно кривая ВЭЗ является зеркальным отображением кривой, приведенной на рисунке. Амплитуда изменения ρ_k для плохо проводящего шара примерно вдвое меньше, чем для такого же хорошо проводящего объекта.

Интенсивность аномалии от локального объекта зависит от размера приемной линии. Кажущееся сопротивление пропорционально среднему значению плотности тока между электродами M и N . Поэтому величина аномальной компоненты кажущегося сопротивления всегда меньше ее значения в точке экстремума при $MN \rightarrow 0$. Так как обычно в процессе зондирова-

ния увеличивается не только разнос AB , но и разнос MN , то при больших разносах происходит уменьшение амплитуды аномалии. В приведенном на рис. 2.20, б примере при изменении разноса MN в три раза, с $0,4a$ до $1,2a$, по сравнению со случаем $MN \rightarrow 0$ $\rho_{к ас}$ увеличилось в 1,23 раза с $0,43\rho_1$ до $0,53\rho_1$. Во столько же раз уменьшилась амплитуда аномалии.

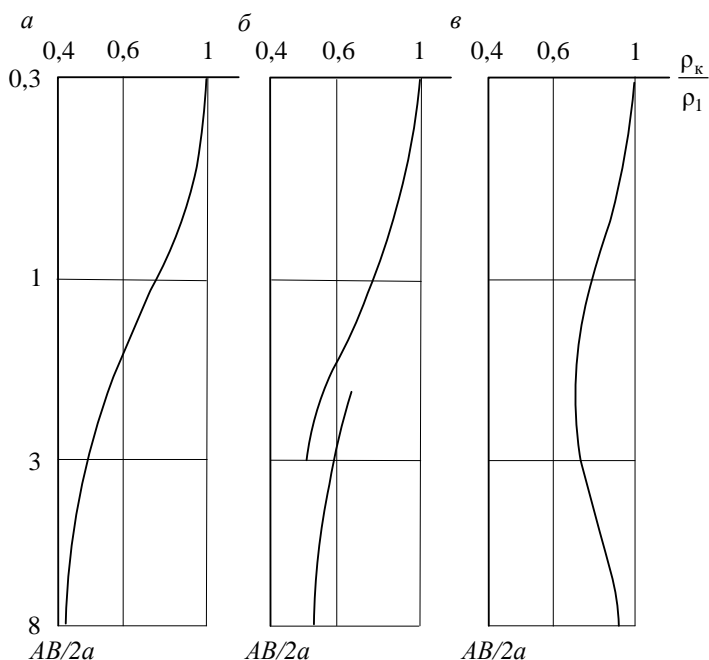


Рис. 2.20. Кривые ВЭЗ с разными установками над проводящим шаром ($\rho_k=0, h=1,5 a$):
 а – с постоянным разномом $MN=0,4a$; б – с разносами $MN=0,4a$ и $1,2a$; в – с установкой Веннера ($MN=1/3AB$)

В установке Веннера, в которой отношение разносов AB и MN остается все время постоянным ($AB/MN=3$), форма кривой зондирования изменяется. При больших размерах установки, когда разнос MN значительно больше размера объекта, кажущееся сопротивление стремится к сопротивлению вмещающей

среды. Максимальная аномалия наблюдается в средней части кривой (см. рис. 2.20, в). Интенсивность аномалии существенно меньше, чем в установке Шлюмберже ($MN \ll AB$), в приведенном примере почти вдвое.

Рассмотренные особенности кривых зондирования позволяют сделать вывод, что при использовании ВЭЗ для поисков локальных объектов следует работать с минимальными размерами приемных линий, при которых возможны уверенные измерения ΔU .

На разрезах (вертикальных картах) ρ_k локальный объект, залегающий в однородной среде, выделяется не замкнутой снизу областью пониженных (при $\rho_2 < \rho_1$) или повышенных (при $\rho_2 > \rho_1$) значений. Теоретический пример разреза ρ_k для проводящего шара приведен на рис. 2.21. В случае плохо проводящего шара характер вертикальной карты остается таким же, но объект выделяется повышенными значениями ρ_k при меньшей интенсивности аномалии. Практический пример разреза ρ_k над хорошо проводящим колчеданным рудным телом приведен на рис. 2.22.

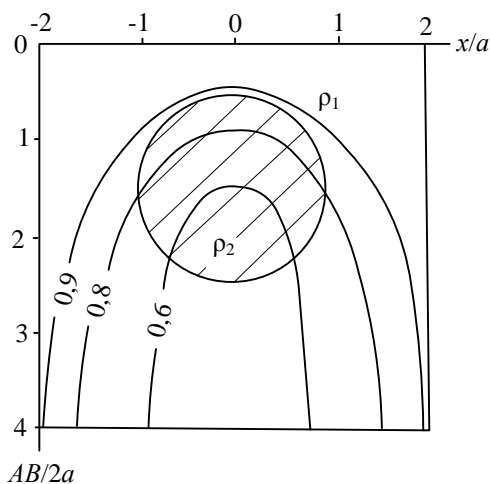


Рис. 2.21. Вертикальная карта

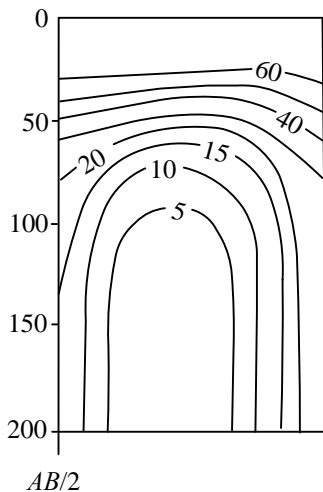


Рис. 2.22. Вертикальная карта ρ_k

ρ_k/ρ_1 над проводящим шаром
($\rho_2=0, h=1,5a, MN=0,4a$)

над колчеданным рудным телом
(Новый Сибай) при слабом влиянии
слоя рыхлых отложений
(по С. А. Петропавловскому)

Над маломощными крутопадающими проводящими объектами при ориентировке симметричной установки вкрест их простирания аномалии имеют малую амплитуду. Это можно видеть на примере проводящего диска (см. рис. 2.10). Над мало-мощной вертикальной колчеданной линзой (см. рис. 2.11, *a*) в симметричной установке аномалии также не наблюдается. Понижение ρ_k наблюдается только над кварцевосерицитовыми сланцами западнее рудного тела.

Если установку ориентировать по простиранию таких объектов, над ними наблюдаются аномалии, аналогичные аномалиям от изометричных тел, но меньшей интенсивности. Поэтому при поисках крутопадающих проводящих объектов небольшой мощности выполнение зондирований с ориентировкой установки вкрест их простирания не имеет смысла. Установку в этом случае следует ориентировать вдоль простирания, т. е. перпендикулярно профилю.

2.13. Электрическое зондирование над приповерхностными объектами

Для изучения вида кривых зондирования над приповерхностными неоднородностями воспользуемся моделью в виде полушара с удельным сопротивлением ρ_2 и радиусом a , плоская поверхность которого совмещена с поверхностью земли (рис. 2.23). Пусть приемная линия расположена в центре объекта. В этом случае, если разнос питающих электродов AB мал по сравнению с диаметром объекта, ток растекается внутри полушара как в однородной среде, и $\rho_k \rightarrow \rho_2$. По мере увеличения питающей установки на растекание тока начинают оказывать влияние границы объекта. Если объект проводящий, ток в нем концентрируется, и плотность тока j_{MN} , а следовательно и ρ_k

растут (см. рис. 2.23, *a*). В случае плохо проводящего объекта ток натекает из него в более проводящую вмещающую среду, плотность тока j_{MN} и ρ_k уменьшаются (см. рис. 2.23, *б*).

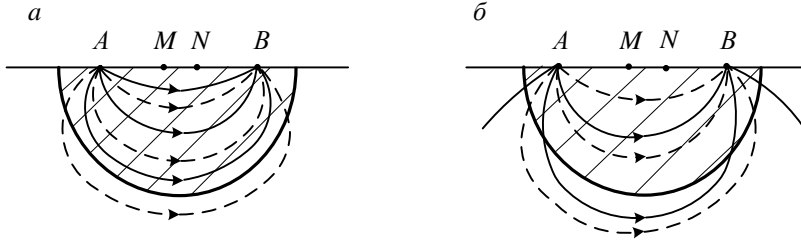


Рис. 2.23. Искажение растекания тока внутри проводящей (*a*) и плохо проводящей (*б*) неоднородности при расположении установки внутри объекта: штриховые линии – токовые линии нормального поля; сплошные – то же в присутствии объекта

После выхода питающих электродов из неоднородности, если приемная линия остается внутри объекта, при дальнейшем увеличении размеров установки кажущееся сопротивление изменяется мало. В случае проводящего полушара оно немного растет, в случае плохо проводящего полушара едва заметно уменьшается (рис. 2.24). Асимптотическое значение ρ_k можно оценить, используя уравнения для случая однородного первичного поля. При $MN \ll 2a$

$$\rho_{k\text{ac}} = \frac{3\rho_1\rho_2}{\rho_1 + 2\rho_2}. \quad (2.13)$$

Как следует из этой формулы, в случае проводящей неоднородности даже при самых больших разностях AB кажущееся сопротивление остается намного меньшим сопротивления вмещающей среды, т. е. сохраняется интенсивная аномалия (см. рис. 2.24, *a*). В случае плохо проводящего объекта при больших размерах питающей линии ρ_k относительно мало отличается от сопротивления вмещающей среды (в приведенном на рис. 2.24, *б* примере на одну треть), т. е. аномалия с увеличением разностей AB затухает.

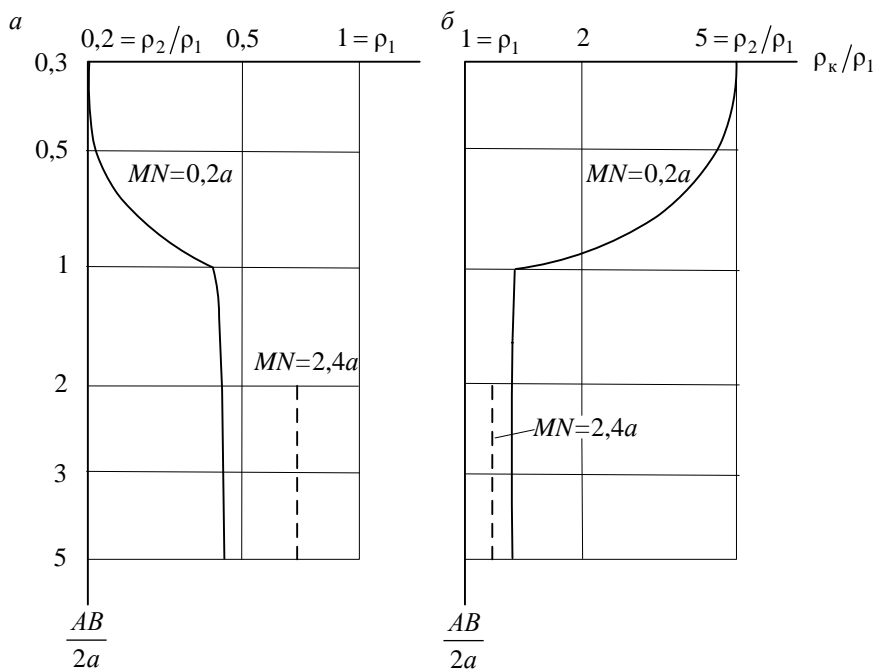


Рис. 2.24. Кривые ВЭЗ над полушаром, выходящим на поверхность земли:
 $a - \rho_2 = 0,2\rho_1$; $b - \rho_2 = 5\rho_1$

Если в процессе зондирования размер приемной линии тоже увеличивается так, что приемные электроды выходят во вмещающую среду, то как и при зондировании над шаром происходит резкое изменение амплитуды аномалии. В случае проводящей неоднородности ρ_k увеличивается, в случае проводящего объекта – уменьшается. В обоих случаях ρ_k приближается к сопротивлению вмещающей среды (см. рис. 2.24).

На рис. 2.25 приведен практический пример результатов зондирования над карманом рыхлых отложений. Начальная асимптота кривой ВЭЗ соответствует удельному сопротивлению рыхлых отложений – порядка 40 Ом·м. Затем по мере увеличения разносов AB кажущееся сопротивление быстро, но плавно растет. При разносе $AB/2$ порядка 60-70 м размер приемной ли-

нии превысил ширину объекта. Поэтому рост ρ_k резко замедляется и кривая стремится к асимптотическому значению ρ_k около 2000 Ом·м (см. рис. 2.25, б). Удельное сопротивление вмещающей среды порядка 4000 Ом·м. В целом кривая имеет такой же характер, как теоретическая кривая на рис. 2.24, а.

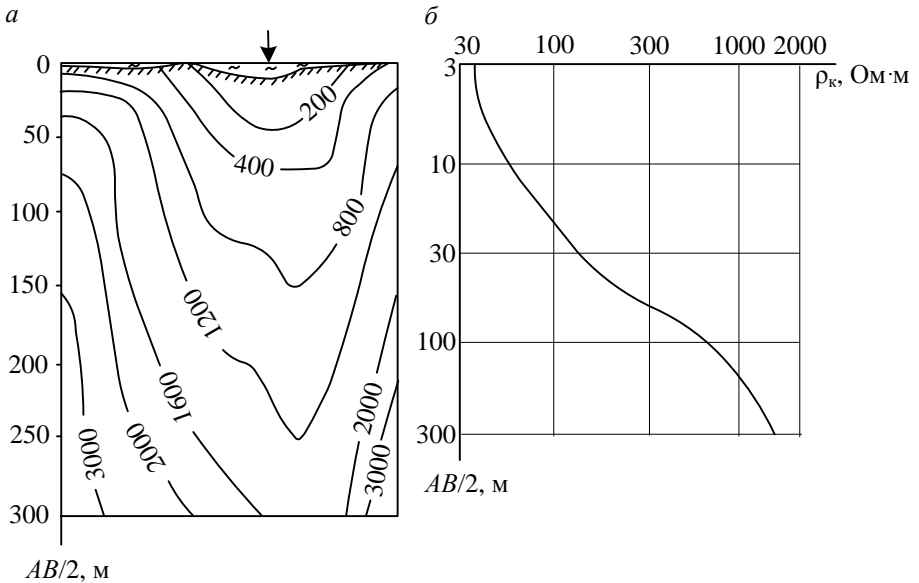


Рис. 2.25. Результаты электрического зондирования над "карманом" рыхлых отложений (по Б. В. Карманову):
 а – вертикальная карта ρ_k ; б – кривая зондирования (положение точки зондирования показано стрелкой)

На разрезе ρ_k карман рыхлых отложений проявляется в виде вертикальной области пониженного кажущегося сопротивления, не заканчивающейся при максимальном разное питающих электродов (см. рис. 2.25, а).

2.14. Электрическое зондирование над локальными объектами в двухслойной среде

В реальных условиях коренные породы обычно перекрыты более проводящим верхним слоем – рыхлыми отложениями

и корой выветривания. Эти образования можно заменить эквивалентным слоем. Тогда нормальный геоэлектрический разрез станет в первом приближении двухслойным. Аномалия от локального объекта в этом случае наблюдается на фоне двухслойной кривой. Для идеально проводящего шара в двухслойной среде получено решение методом зеркальных изображений [23]. Выражение для аномального потенциала от шара на поверхности земли в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U_a = & \frac{I\rho_1}{\pi} a(1 - k_{12}^2) \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{R_m} \times \right. \\
 & \times \frac{k_{12}^{m+n}}{\sqrt{\left(x - \frac{a^2 x_0}{R_m^2}\right)^2 + \left(y - \frac{a^2 y_0}{R_m^2}\right)^2 + \left[h + 2nh_1 - \frac{a^2(h + 2mh_1)}{R_m^2}\right]^2}} - \\
 & \left. - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k_{12}^{m+n}}{R_m \sqrt{x^2 + y^2 + (h + 2nh_1)^2}} \right\}, \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

где $R_m = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + (h + 2mh_1)^2}$; h_1 – мощность верхнего слоя; ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления верхнего слоя и вмещающей среды; k_{12} – коэффициент отражения на границе слоев; a – радиус шара; h – глубина до центра шара; x_0 и y_0 – координаты источника тока; x и y – координаты точки наблюдений.

Полное значение потенциала равно сумме потенциала на поверхности двухслойной среды, который в данном случае является потенциалом нормального поля, и аномального потенциала от шара, определяемого формулой (2.14).

Чтобы получить уравнение кажущегося сопротивления при малом размере приемной линии (для установки Шлюмберже) надо продифференцировать выражение потенциала и умножить на коэффициент установки:

$$\rho_k = -K \frac{1}{I} \frac{\partial U}{\partial x} = K \frac{E_x}{I}.$$

Над центром шара выражение кажущегося сопротивления для трехэлектродной и симметричной установок имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_k = \rho_1 & \left\{ 1 + 2L^3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_{12}^n}{[L^2 + (2nh_1)^2]^{3/2}} \right\} - \\ & - 2\rho_1(1 - k_{12}^2) a^3 L^3 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k_{12}^{m+n}}{[L^2 + (h + 2mh_1)^2]^{3/2}} \times \\ & \times \frac{1}{\left\{ \frac{a^4 L^2}{[L^2 + (h + 2mh_1)^2]^2} + \left[h + 2nh_1 - \frac{a^2(h + 2mh_1)}{L^2 + (h + 2mh_1)^2} \right]^2 \right\}^{3/2}}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

В этой формуле $L=x-x_0$ – размер трехэлектродной установки (или полуразнос питающих электродов $AB/2$ симметричной установки). Первое слагаемое представляет собой кажущееся сопротивление на поверхности двухслойной среды, которое в данном случае имеет смысл ρ_k нормального поля. Второе слагаемое – аномальная компонента ρ_k , вызванная шаром.

Вид результирующей кривой зондирования зависит от того, на каком участке двухслойной кривой наблюдается наиболее сильное изменение ρ_k , вызванное локальным объектом. Если вызванное проводящим объектом уменьшение ρ_k превышает на этом участке рост кажущегося сопротивления, вызванный слоистостью среды, на фоне роста ρ_k появляется аномалия такого же вида, как и в случае однородной вмещающей среды (рис. 2.26, а). Если уменьшение ρ_k , вызванное локальным объектом, совпадает с участком более быстрого роста ρ_k на двухслойной кривой, результирующая кривая по форме качественно не отличается от двухслойной кривой. Наблюдается только смещение нижней части кривой в сторону меньших значений ρ_k (см. рис. 2.26, б).

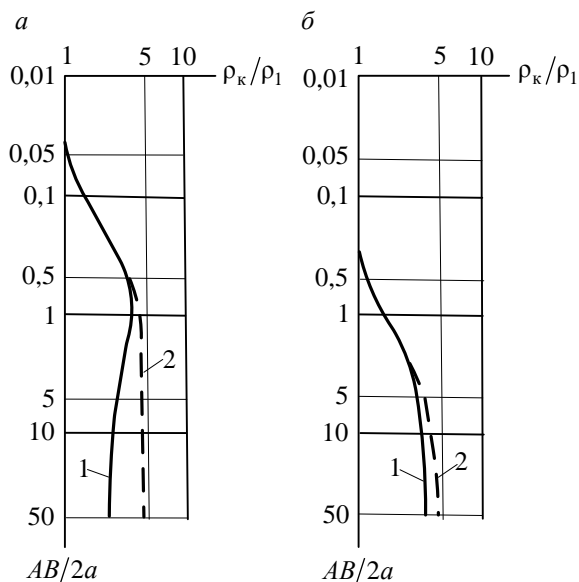


Рис. 2.26. Кривые зондирования над проводящим шаром в двухслойной среде ($h=1,5a$; $\rho_2/\rho_1=5$):
 а - $h=0,05a$; б - $h=0,3a$; 1 – кривые ВЭЗ над шаром в двухслойной среде;
 2 – то же в двухслойной среде без шара

Различие формы кривых зондирования приводит к различию вида разрезов ρ_k . Для второго случая теоретически рассчитанный разрез ρ_k (рис. 2.27, б) принципиально не отличается от вертикальной карты ρ_k для приповерхностной неоднородности (см. рис. 2.25). В таких случаях очень трудно разделить аномалии от приповерхностных неоднородностей и от объектов на глубине. В первом случае, когда влияние верхнего слоя не слишком велико (см. рис. 2.27, а), на фоне общего роста ρ_k с увеличением размера установки, наблюдается область пониженных значений кажущегося сопротивления, имеющая вид, аналогичный случаю аномалии от объекта в однородной среде. (см. рис. 2.21).

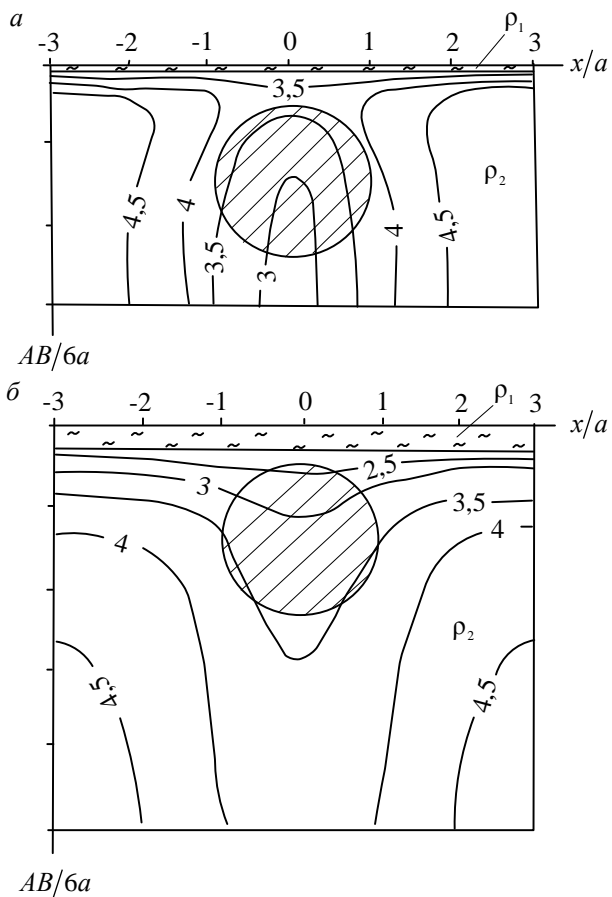


Рис. 2.27. Вертикальные карты ρ_k/ρ_1 над проводящим шаром в двухслойной среде ($h=1,5a$; $\rho_2/\rho_1=5$):
a - $h=0,05a$; *б* - $h=0,3a$.

Практический пример разреза ρ_k над проводящим объектом в условиях очень слабого влияния верхнего слоя был приведен на рис. 2.22. Пример результатов ВЭЗ над рудным телом при более сильном влиянии верхнего слоя приведен на рис. 2.28. Колчеданное рудное тело залегает здесь на глубине чуть больше 150 м до верхней кромки. Суммарная мощность

рыхлых отложений и коры выветривания составляет 40-50 м. Верхняя часть кривой зондирования соответствует двухслойной кривой с плохо проводящим нижним слоем (кривая выходит на асимптоту под углом 45°). Но после $AB/2 \approx 700$ м уменьшение ρ_k , связанное с влиянием рудного тела, начинает преобладать над ростом ρ_k , вызванным слоистостью среды. На последних разносах AB над рудным телом наблюдается четкое понижение кажущегося сопротивления (см. рис. 2.28, б). Поперечник рудного тела, имеющего форму, близкую к изометричной, около 300 м. Оценка минимально необходимого размера установки по формуле (2.10) дает $L/a \approx 4,5$, т. е. примерно 700 м. При этом разносе $AB/2$ и начинается отклонение кривой от асимптоты.

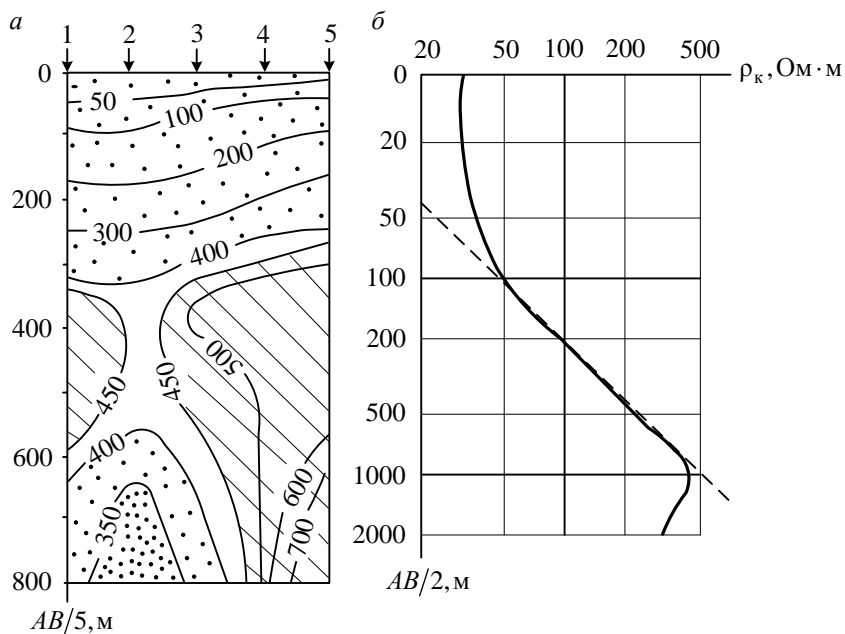


Рис. 2.28. Результаты зондирования над колчеданным рудным телом Озерного месторождения (по А. П. Калташеву):
 а – вертикальная карта ρ_k ; б – кривая зондирования на точке 2 (точки зондирования показаны стрелками)

На вертикальной карте сопротивлений (см. рис. 2.28, *a*) при больших разносах AB наблюдается не замкнутая снизу область пониженных значений ρ_k . В целом разрез ρ_k аналогичен приведенному на рис. 2.27, *a* теоретическому примеру.

Значительно более сильное влияние верхнего слоя наблюдается в примере, приведенном на рис. 2.29. Геологический разрез, над которым выполнялось зондирование, приведен на рис. 2.11.

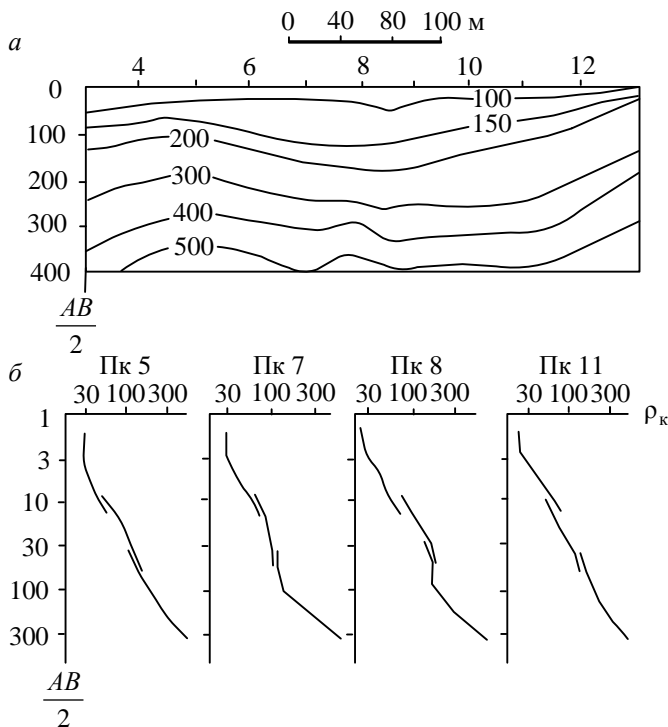


Рис. 2.29. Вертикальная карта ρ_k и кривые ВЭС на Айвинском колчеданном месторождении (рудное тело между пикетами 7 и 8) при ориентировке установки по простиранию пород. Геологический разрез см. на рис. 2.11

Маломощная вертикально падающая колчеданная линза залегает на глубине 50 м до верхней кромки. С учетом крутого

падения и малой мощности объекта ВЭЗ выполнялось с ориентировкой установки вкрест профиля, т. е. по простиранию пород. Слой рыхлых отложений с удельным сопротивлением около 30 Ом·м имеет мощность примерно 5 м. Кроме него есть не показанная на разрезе кора выветривания. Судя по кривым зондирования кора выветривания имеет удельное сопротивление порядка 100 Ом·м, а суммарная мощность обоих слоев составляет 10-15 м. На рис. 2.29 рудное тело располагается посередине между пикетами 7 и 8.

На этих пикетах на кривых зондирования наблюдается довольно четкий минимум ρ_k на фоне наклоненных под углом 45° асимптотических частей кривых. Но на фоне быстрого увеличения кажущегося сопротивления, вызванного слоистостью среды, в области минимума происходит только замедление роста ρ_k (рис. 2.29, б). Поэтому на вертикальной карте ρ_k аномалия от рудного тела не проявляется. Наблюдается только широкий плавный прогиб изом к низу, вызванный полосой рудовмещающих кварцесерицитовых сланцев.

Последний пример показывает, что при анализе результатов ВЭЗ, если работы ориентированы на поиски локальных объектов, не следует ограничиваться только рассмотрением разрезов ρ_k . Надо обязательно анализировать поведение кривых зондирования.

При еще более сильном влиянии верхнего слоя на кривых зондирования минимум, вызванный локальным объектом, пропадает и наблюдается лишь некоторое смещение конечных частей кривых ВЭЗ в сторону меньших значений ρ_k , как в теоретическом примере, приведенном на рис. 2.26, б.

2.15. Другие модификации зондирования при поисках локальных объектов

Как было показано выше, в случае влияния электропроводного приповерхностного слоя при зондировании симметричной установкой не всегда можно разделить аномалии, вызван-

ные объектами глубинного характера и неоднородностями приповерхностного слоя. При поисках крутопадающих или изометричных проводящих объектов более уверенно задача классификации аномалий решается зондированием с однополярной установкой. Практически целесообразнее измерения выполнять не с установкой A^+MNB^+ , а с двумя встречными трехэлектродными установками, а затем вычислять $\Delta\rho_k = \rho_k^{AMN} - \rho_k^{MNB}$. Это связано с тем, что при непосредственном измерении с однополярной установкой теряется информация об абсолютных значениях кажущегося сопротивления. Измерения с установкой комбинированного профилирования позволяют получить кажущееся сопротивление для трех типов установок: двух встречных трехэлектродных, симметричной и однополярной. При большом объеме информации, естественно, увеличиваются и классификационные возможности.

Свойства однополярной установки объясняются особенностями распределения плотности тока. В ней максимум плотности тока располагается не на поверхности земли, а на глубине $A^+B^+ / 2\sqrt{2}$. На поверхности земли нормальная плотность тока равна нулю (см. рис. 2.8, а). Максимальная аномалия наблюдается, когда максимум плотности тока располагается на уровне объекта (см. рис. 2.8, б). Изменяя размер установки можно перемещать максимум плотности тока в вертикальном направлении, настраивая таким образом установку на обнаружение объектов, залегающих на различной глубине.

При профилировании однополярной установкой локальный проводящий объект отмечается переходом $\Delta\rho_k$ через нуль с положительных значений на отрицательные. Слева располагается положительный экстремум $\Delta\rho_k$, справа – отрицательный (см. рис. 2.7 и 2.10). При изменении размера установки амплитуда экстремумов изменяется. Выполнив измерения при нескольких размерах установки, т. е. проведя зондирование, можно построить разрез $\Delta\rho_k$, на котором объект отмечается вертикальной нулевой линией. Слева и справа от нулевой линии располагаются области максимальных положительных и отрицательных значе-

ний $\Delta\rho_k$. Наибольшие значения $\Delta\rho_k$ наблюдаются, когда $AB/3$ соответствует глубине до верхней части объекта. Вид вертикальной карты $\Delta\rho_k$, полученной при моделировании над латунной пластинкой, приведен на рис. 2.30.

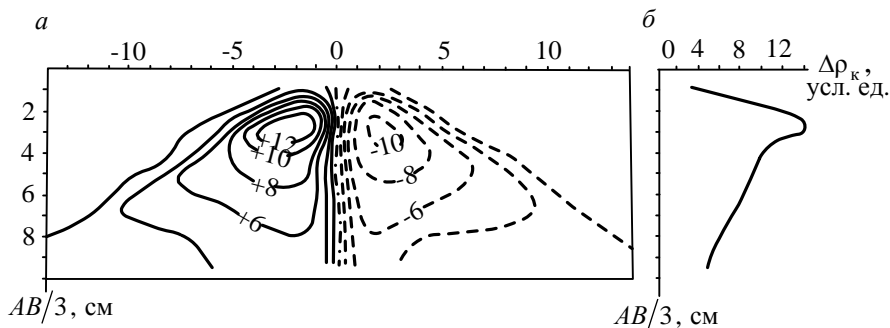


Рис. 2.30. Результаты зондирования с однополярной установкой (глубина до верхней кромки пластинки 1,5 см):
 а – вертикальная карта $\Delta\rho_k$ (оцифровка изолиний в условных единицах); б – зависимость $\Delta\rho_k$ от $AB/3$ (пикет -2)

Практический пример зондирования с однополярной установкой на колчеданном месторождении приведен на рис. 2.31. На профиле 1, расположенном над рудным телом, объект, как и в случае моделирования, на вертикальной карте $\Delta\rho_k$ отмечается нулевой линией. Слева и справа от нулевой линии наблюдаются области максимальных значений $\Delta\rho_k$ разного знака. В принятом вертикальном масштабе они располагаются на уровне рудного тела (см. рис. 2.31, а). Слева от объекта замкнутая область наибольших значений $\Delta\rho_k$ совпадает с аномалией, вызванной контактом рудовмещающих сланцев. Справа контакт находится на некотором удалении от рудной линзы и четко отмечается повышенными отрицательными значениями $\Delta\rho_k$ на пикете 12 и восточнее, до пикета 16. Четкая замкнутая область высоких отрицательных значений $\Delta\rho_k$, связанная с рудным телом, наблюдается между пикетами 9 и 11. Результаты ВЭЗ по этому профилю были приведены на рис. 2.29.

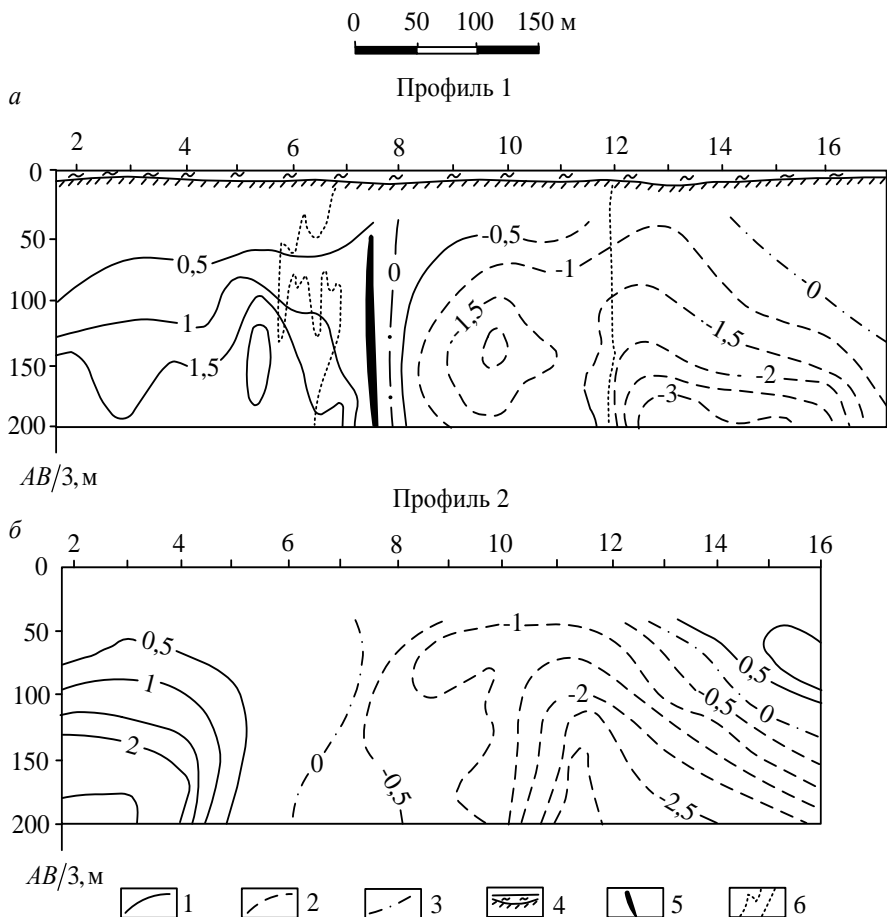


Рис. 2.31. Вертикальные карты Δr_k на Айвинском месторождении:

a – над рудным телом; *b* – в 200 м от рудного тела

Изолинии Δr_k : 1 – положительные; 2 – отрицательные; 3 – нулевые; 4 – рыхлые отложения и поверхность коренных пород; 5 – колчеданные руды; 6 – контур полосы кварцево-серпичитовых сланцев

На профиле 2, смещенном от рудного тела на 200 м по направлению простирания пород, выделяются только аномалии от контактов сланцевой полосы. Замкнутых изолиний Δr_k не наблюдается (см. рис. 2.31, *b*).

Над приповерхностной неоднородностью характер вертикальной карты резко отличается от разрезов $\Delta\rho_k$ как над рудной линзой, так и над проводящей полосой кварцевосерицитовых сланцев. Над карманом наносов (рис. 2.32) наибольшие значения $\Delta\rho_k$ по разные стороны от нулевой линии наблюдаются при самом малом размере установки. При увеличении разноса питающих электродов значения $\Delta\rho_k$ быстро уменьшаются и в приведенном примере при $AB/3=60-80$ м аномалия полностью затухает.

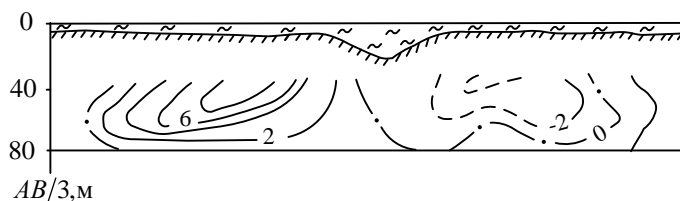


Рис. 2.32. Вертикальная карта $\Delta\rho_k$ над карманом рыхлых отложений.

Пояснения см. на рис. 2.31

Рассмотренные примеры показывают, что по результатам зондирования с однополярной установкой разделение аномалий, вызванных приповерхностными неоднородностями и объектами, залегающими на глубине, может быть произведено более уверенно. Разделить аномалии от локальных объектов и крутопадающих проводящих пластов удастся не во всех случаях, но аномалии от приповерхностных неоднородностей удастся отбраковать практически всегда.

Другая модификация зондирования, в которой для изменения глубины исследования используется перемещение максимума плотности тока по вертикали – зондирование с погруженным электродом. Эту разновидность зондирования можно использовать непосредственно для поисков рудных тел или для изучения аномалий метода заряда и других методов в окрестностях скважины. Метод заключается в измерении кажущегося

сопротивления на поверхности земли в поле источника тока, перемещающегося по скважине. Второе питающее заземление относится на достаточно большое расстояние, как в методе заряда. Результаты измерений изображаются в виде кривой зондирования – зависимости ρ_k от глубины H источника тока в скважине. Когда питающий электрод располагается на уровне проводящего объекта или ниже его, ток натекает в объект и на поверхности земли плотность тока уменьшается. Поэтому кажущееся сопротивление над объектом тоже уменьшается. По уменьшению ρ_k , начинающемуся при некоторой глубине питающего электрода и продолжающемуся при дальнейшем погружении источника в скважину, устанавливается наличие объекта и примерная глубина его залегания. Положение объекта в плане устанавливается по результатам зондирования на нескольких радиальных профилях.

Чтобы учесть влияние колебаний электропроводности покровных отложений (ρ_{MN}) в разных точках зондирования, рассматриваются не абсолютные, а относительные значения кажущегося сопротивления, равные отношению ρ_k/ρ_{k0} . Здесь ρ_{k0} – кажущееся сопротивление, измеренное при расположении питающего электрода на поверхности земли около устья скважины. Если среда однородная, при всех значениях H $\rho_k/\rho_{k0}=1$ отклонения от единицы вызываются неоднородностью среды и рассматриваются как аномалии.

На рис. 2.33, б приведены результаты зондирования с погруженным электродом на Майском колчеданном месторождении. Питающий электрод перемещался по скважине 1, расположенной в 80 м от рудной залежи. В точках, расположенных над рудными залежами, начиная с $H=60-70$ м, т. е. с H примерно равной глубине до верхней кромки оруденения, ρ_k/ρ_{k0} понижается. С противоположной от месторождения стороны профиля по всей длине кривых ρ_k/ρ_{k0} отличается от единицы не более, чем на 10 %. Исключение составляет кривая зондирования на ближайшей к скважине точке, на которой еще наблюдается влияние рудных тел.

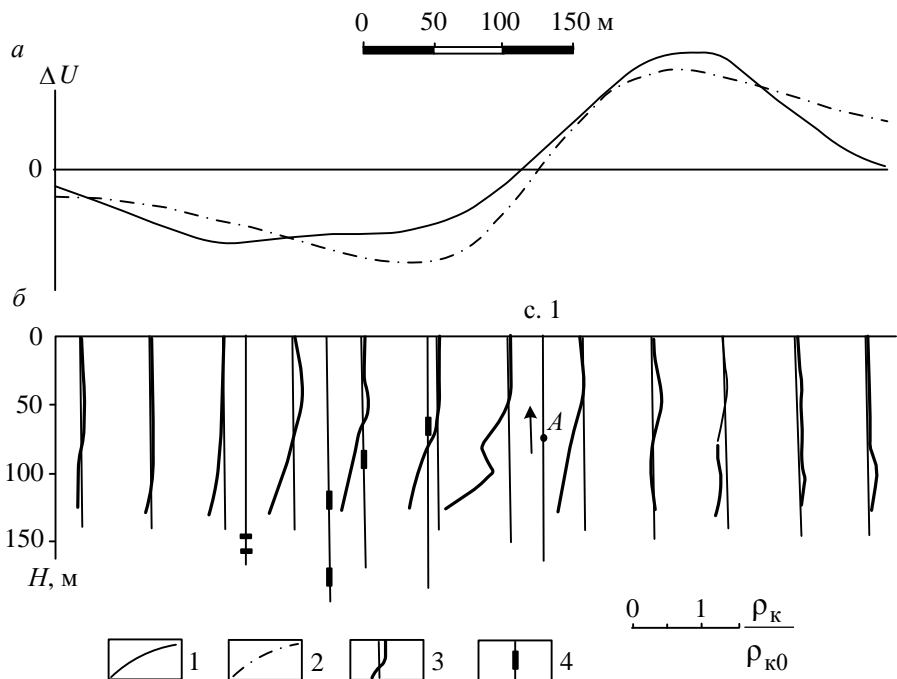


Рис. 2.33. Результаты зондирования с погруженным электродом на Майском колчеданном месторождении (Башкирия):

a – графики ΔU в поле источника *A* на забое скважины 1; *b* – графики ρ_k/ρ_{k0} при перемещении источника *A* по скважине 1.

1 – график ΔU ; 2 – график ΔU нормального поля (расчетный); 3 – графики ρ_k/ρ_{k0} ; 4 – скважины и рудные подсечения в них

На графике ΔU , измеренном при расположении питающего электрода на забое скважины, рудные тела отмечаются небольшим смещением перехода через нуль и уменьшением значений градиента потенциала по отношению к рассчитанному нормальному полю (см. рис. 2.33, *a*).

На правом конце профиля наблюдается аналогичная аномалия, но более интенсивная, чем над месторождением. По данным зондирования на этой аномалии значения ρ_k/ρ_{k0} практически не отличаются от единицы. Поэтому она не может быть связана с глубинным объектом и не представляет интереса.

Рассмотренный пример показывает, что результаты зондирования с погруженным электродом позволяют классифицировать аномалии метода заряда.

Осложнения при зондировании с погруженным электродом могут возникать в случае наличия крутопадающих границ раздела, которые вызывают искажения кривых ρ_k/ρ_{k0} .

2.16. Электрическое профилирование с незаземленными линиями

В районах со сложными условиями заземлений, чтобы получить результаты, подобные результатам электроразведки на постоянном токе, применяют профилирование с бесконтактными измерениями электрического поля (БИЭП). В этом случае используют емкостный способ возбуждения и измерения поля. При таких измерениях питающая и приемная линия представляют собой куски изолированного провода, разложенные на земле или подвешенные на небольшой высоте. При соответствующем выборе частоты и размеров установки результаты таких измерений аналогичны результатам измерений на постоянном токе с заземленными линиями [40].

Для возбуждения в земле электрического поля незаземленные провода питающей линии подключают к генератору переменного напряжения. При включении генератора провода приобретают электрические заряды, знак которых соответствует полярности зажимов генератора в данный момент времени. Благодаря наличию распределенной емкости, между проводом и землей протекает ток смещения, создающий вдоль проводов у поверхности земли электрические заряды. Под действием этих зарядов в земле возникает переменное электрическое поле, так же как в случае заземленной линии (рис. 2.34, а).

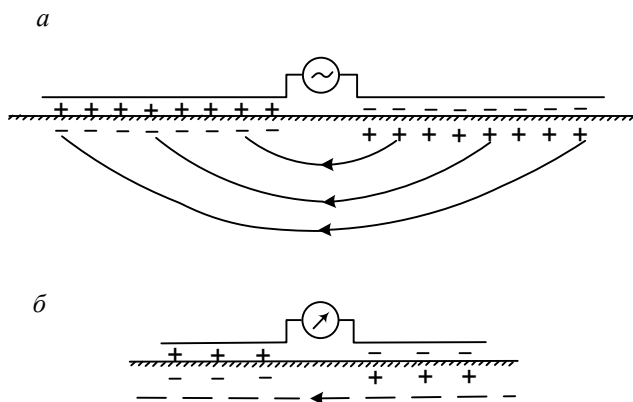


Рис. 2.34. Принцип емкостного возбуждения (а) и измерения (б) электрического поля

Измерение поля производится аналогичным образом. Протекающий в земле электрический ток создает на участке расположения проводов приемной линии разность потенциалов. Через существующую между землей и проводами емкость разность потенциалов передается в приемную линию и измеряется измерителем (см. рис. 2.34, б). Измеритель для БИЭП должен иметь очень высокое входное сопротивление.

Способ возбуждения электрического поля при его бесконтактном измерении не обязательно должен быть емкостным. Он может быть также гальваническим или индуктивным.

Бесконтактные измерения электрического поля применяются в электропрофилировании с установками срединного градиента, дипольного и комбинированного профилирования. Могут использоваться три типа приемных линий: подвесная, стелющая или штыревая. В модификации срединного градиента может использоваться любой тип приемной линии. В дипольном и комбинированном профилировании применяются стелющиеся приемные линии.

Подвесная и штыревая линии представляют собой симметричные электрические диполи. Измерительный прибор под-

ключается в центре линии. Размер линии MN равен расстоянию между серединами ее плеч.

Подвесная линия изготавливается из двух кусков мягкого изолированного провода. Концы проводов тщательно изолируются. При измерениях линия ориентируется по направлению профиля и удерживается за ее концы двумя рабочими на высоте 0,8-1 м от земли (рис. 2.35, *a*).

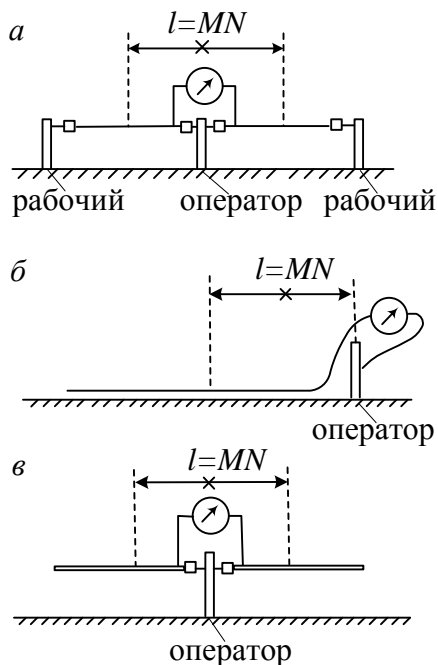


Рис. 2.35. Типы приемных линий при БИЭП:
a – подвесная; *б* – стелюшная; *в* – штыревая.
 Крестиком показана точка записи

Штыревая линия (см. рис. 2.35, *в*) собирается из двух телескопических антенн. В корпус встроены уровни и компас для ориентировки антенны в пространстве. Во время измерений линию держит в руке оператор. Так как штыревая линия может

быть ориентирована в любом направлении, с ней можно измерять любую пространственную компоненту поля.

Стелющаяся линия несимметричная. Один ее электрод линейный, он представляет собой кусок провода с хорошей изоляцией, разложенный на земле по профилю. Чтобы провод плотно прилегал к земле и не испытывал колебаний от ветра и других случайных воздействий, он должен быть достаточно тяжелым. Вторая входная клемма измерителя, замкнутая на корпус прибора, подключается к металлическому браслету, надежному на руку оператора. Таким образом, оператор является вторым электродом (см. рис. 2.35, б). Размером приемной линии MN является половина длины провода. Результат измерения относится к точке, отстоящей от оператора на четверть длины провода (на $MN/2$).

В модификации срединного градиента питающая линия может устраиваться тремя способами, в которых осуществляется гальванический, емкостный или индуктивный способ возбуждения поля. При гальваническом возбуждении поля питающая линия монтируется так же, как при работе на постоянном токе в виде заземленного на концах прямолинейного провода (рис. 2.36, а). При емкостном возбуждении питающая линия делается в виде прямоугольной (обычно квадратной) незаземленной полупетли из изолированного провода. Профили располагаются внутри полупетли (см. рис. 2.36, б). Индуктивное возбуждение осуществляется с помощью незаземленной прямоугольной петли с соотношением сторон 1:2. Профили располагаются вне петли параллельно ее длинной стороне, ориентированной вкрест простирания пород (см. рис. 2.36, в).

Во всех случаях, чтобы избежать сильных индукционных влияний, ближайший к питающему проводу профиль должен отстоять от него не менее чем на 100-150 м. Длина профилей обычно составляет 0,8 размера установки, а для незаземленной петли – половину ее длинной стороны.

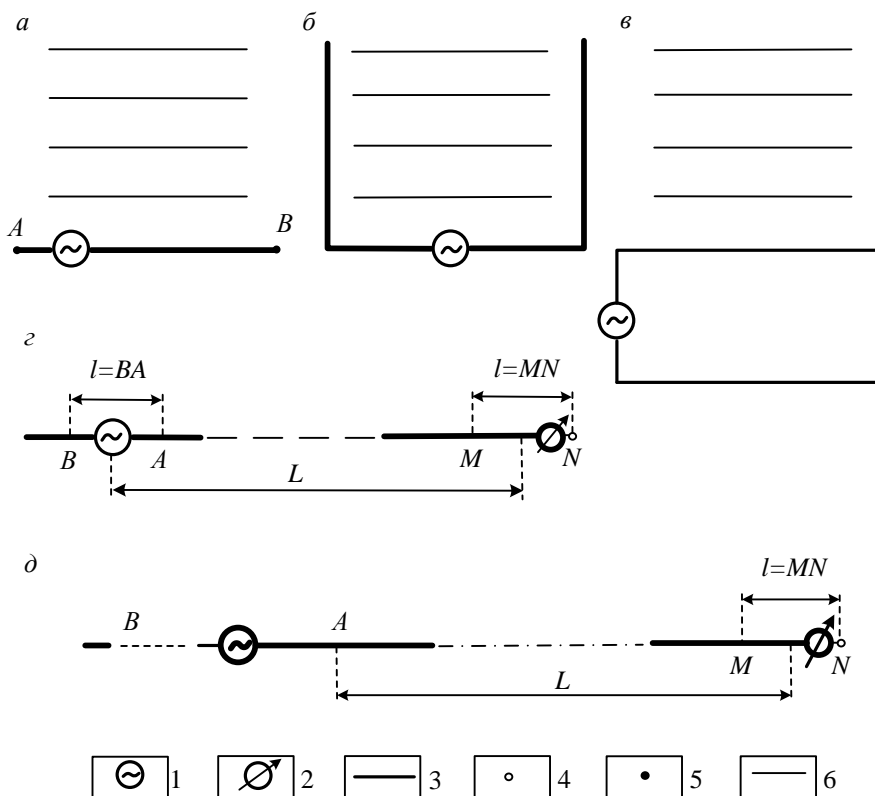


Рис. 2.36. Типы установок, применяющихся при БИЭП:

a-в – установки срединного градиента с заземленной, незаземленной емкостной (полупетля) и незаземленной индукционной (петля) питающими линиями; *г* – дипольная осевая установка; *д* – трехэлектродная установка.

1 – генератор; 2 – измеритель; 3,4 – незаземленные линейный (3) и точечный (4) электроды; 5 – заземленный электрод; 6 – профили

При дипольном профилировании стелющая питающая линия устраивается так же как приемная. За размер установки L принимается расстояние между геометрическим центром питающей линии и точкой записи (см. рис. 2.36, *г*).

При комбинированном профилировании (профилировании с встречными трехэлектродными установками) роль одного питающего электрода играет стелющийся незаземленный про-

вод (A). Вторым электродом (B) служит провод, имеющий длину по крайней мере в 10 раз большую, чем провод электрода A (см. рис. 2.36, δ). Он является аналогом удаленного электрода при профилировании на постоянном токе. Этот провод может быть как незаземленным, так и заземленным. За размер установки принимается расстояние от центра незаземленного провода питающей линии A до электрического центра (точки записи) приемной линии.

Кроме профилирования бесконтактные измерения могут выполняться в методе заряда при работе способом градиента. В этом случае питающая линия устраивается так же как в методе заряда на постоянном токе. Приемная линия обычно подвесная.

Рабочая частота выбирается в пределах от первых сотен до первых тысяч герц. Наиболее часто используется частота 625 Гц. При работе со штыревыми приемными линиями частота берется более высокой. При работе по методике срединного градиента удобнее, чтобы параметр $p=L^2f/\rho$ не превышал 0,1.

Сеть наблюдений и размеры установок выбираются так же как при профилировании на постоянном токе. Так же оценивается и точность наблюдений.

По результатам измерений вычисляется кажущееся сопротивление. Для дипольной и трехэлектродной установок коэффициент установки вычисляется по тем же формулам, что и при работе на постоянном токе. Размеры установок при этом определяются так, как показано на рис. 2.36, ε , δ .

Для установки срединного градиента коэффициент установки

$$K = K_{т.е} \frac{(AB/2)^2}{MN}, \quad (2.16)$$

где $K_{т.е}$ – коэффициент, зависящий от положения точки наблюдений относительно питающей линии. Таблица значений этого коэффициента приведена в инструкции по электроразведке [11]. Так коэффициент установки вычисляется если параметр $p \leq 0,1$. При $p > 0,1$ формула для вычисления коэффициента установки

иная. Для его расчета надо знать среднее значение удельного сопротивления среды на участке.

Результаты профилирования с незаземленными линиями представляют в виде планов графиков ρ_k и планов изоом. При построении графиков обычно пользуются логарифмическим масштабом ρ_k . При резких колебаниях ρ_k логарифмический масштаб позволяет с одинаковой относительной точностью построить и большие и малые значения.

Разработчики методики рекомендуют определять ρ_k по отношению к его нормальному уровню ρ_0 , выбираемому для профиля, а при работе с установкой срединного градиента для всего планшета [40]. Очевидно,

$$\rho_k/\rho_0 = \Delta U/\Delta U_0,$$

где ρ_0 – удельное сопротивление однородной среды, аппроксимирующее нормальное значение ρ_k ; ΔU_0 – разность потенциалов в такой среде – нормальное поле.

Прологарифмировав это выражение, получим:

$$\lg \rho_k - \lg \rho_0 = \lg \Delta U - \lg \Delta U_0.$$

Величина ΔU_0 определяется как среднее значение ΔU :

$$\lg \Delta U_0 = (\lg \Delta U)_{\text{ср.}}$$

Вычисление ΔU_0 через логарифмы, а не через натуральные значения ΔU производится исходя из положения, что распределение сопротивления лучше описывается логнормальным законом. Кажущееся сопротивление вычисляется по формуле:

$$\lg \rho_k = \lg \rho_0 + \lg \frac{\Delta U}{\Delta U_0}. \quad (2.17)$$

За нормальный уровень удельного сопротивления ρ_0 принимают медианное значение ρ_k на участке.

Графики кажущегося сопротивления строятся как графики отклонения ρ_k от ρ_0 . Для этого значение ρ_0 совмещается с линией профиля (осью расстояний). Обычно графики строятся в логарифмическом масштабе, но можно пользоваться и арифметическим масштабом.

На рис. 2.37, а приведен пример графика ρ_k для установки срединного градиента. Кварцевая жила среди гнейсов отме-

чается очень интенсивным максимумом кажущегося сопротивления. Небольшим повышением ρ_k отмечается также дайка гранитов.

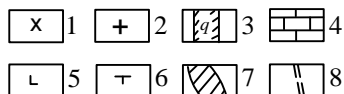
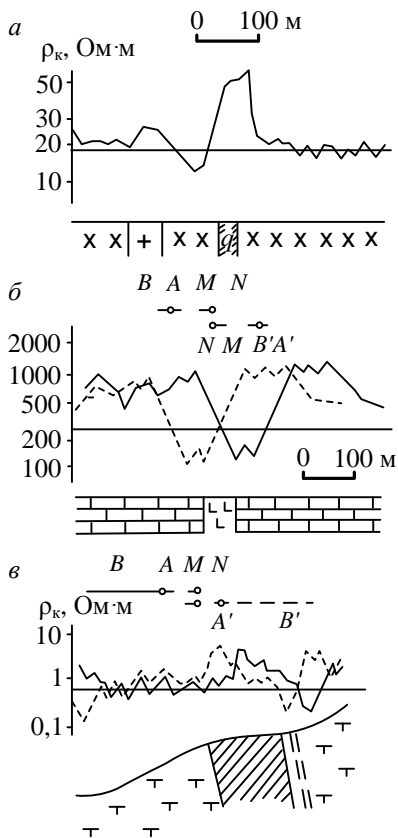


Рис. 2.37. Примеры результатов профилирования с незаземленными линиями (по А. С. Нахабцеву, Б. Г. Спозжникову, А. И. Яблучанскому):

a – график ρ_k срединного градиента над кварцевой жилкой; *б* – график ρ_k двустороннего дипольного профилирования над кимберлитовой трубкой;

в – график ρ_k комбинированного профилирования над зоной гидротермально измененных пород.
 1 – гнейсы; 2 – граниты; 3 – кварцевая жила; 4 – известняки; 5 – кимберлиты; 6 – туфы; 7 – зона гидротермально измененных окварцованных пород; 8 – тектоническое нарушение



Пример результатов двустороннего дипольного профилирования над кимберлитовой трубкой показан на рис 2.37, б. В зоне выветривания кимберлиты имеют пониженное удельное сопротивление по сравнению с вмещающими известняками. На графиках кимберлитовая трубка отмечается четким прямым пересечением, характерным для проводящих объектов.

Пример графиков комбинированного профилирования приведен на рис. 2.37, в. Над зоной гидротермально измененных

пород, имеющих высокое сопротивление из-за сильного окварцевания, наблюдается обратное пересечение графиков и повышение ρ_k для обеих установок. Справа от этой аномалии наблюдается прямое пересечение графиков встречных установок, которым отмечается проводящая тектоническая зона.

Приведенные примеры показывают, что при БИЭП аномалии по виду не отличаются от аномалий при профилировании на постоянном токе. Поэтому для их интерпретации можно использовать все приемы, разработанные для методов сопротивлений на постоянном токе.

2.17. Влияние электропроводного приповерхностного слоя на результаты электроразведки

Нормальный геоэлектрический разрез в рудных районах обычно можно полагать трехслойным. Верхний слой представлен рыхлыми отложениями, под ним залегает кора выветривания, нижнюю часть разреза слагают свежие коренные породы, вмещающие объекты поисков. Верхние два слоя, за редкими исключениями, имеют пониженное сопротивление и оказывают экранирующее действие на электрическое поле. Электрический ток концентрируется в проводящих верхних слоях, а в подстилающей среде плотность тока уменьшается. Это приводит к уменьшению интенсивности аномалий от объектов, залегающих ниже экранирующего слоя, по сравнению со случаем их расположения в однородном полупространстве. Если в процессе работы изменяется расстояние между перемещающейся приемной линией и неподвижными питающими заземлениями, при наличии электропроводного верхнего слоя нормальное поле отличается от поля в однородной среде.

При анализе влияния электропроводных приповерхностных отложений в качестве нормального геоэлектрического разреза можно принять двухслойный разрез. Для этого два верхних слоя надо заменить эквивалентным слоем. Продольную проводимость и мощность эквивалентного слоя надо принять равны-

ми суммарной продольной проводимости и суммарной мощности двух верхних слоев реального разреза. Этот прием, как показано в работе [21], можно применить и в случае градиентного характера среды, когда сопротивление по вертикали изменяется постепенно, без четкой границы между двумя верхними слоями.

Для количественной оценки экранирующего действия верхнего слоя можно использовать коэффициент экранирования \mathcal{E} , равный отношению интенсивности аномалии A_0 от объекта в однородном полупространстве к интенсивности аномалии A от этого же объекта в двухслойной среде:

$$\mathcal{E} = \frac{A_0}{A}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим механизм экранирующего действия верхнего электропроводного слоя более подробно. Стекающий с питающих заземлений ток концентрируется в проводящем слое. Плотность тока в этом слое по сравнению с плотностью тока в однородном полупространстве увеличивается. Соответственно уменьшается плотность тока в подстилающей среде (рис. 2.38). При горизонтальной ориентировке поля на границе раздела, в соответствии с граничным условием,

$$\frac{j_2}{j_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad \text{и} \quad j_2 = j_1 \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (2.19)$$

Если размер установки достаточно большой, в интересующем нас интервале глубин (до нижней кромки локального объекта) поле можно считать однородным. В этом случае плотность тока в каждом слое постоянна и соотношения (2.19) справедливы для всего рассматриваемого интервала глубин. Таким образом, в этом случае плотность тока первичного поля в объеме, занятом объектом, в ρ_2/ρ_1 раз меньше, чем на поверхности земли, где расположена приемная линия. Следовательно, интенсивность аномалии тоже должна быть в ρ_2/ρ_1 раз меньше, чем в случае однородной вмещающей среды, когда плотность тока во всем объеме одинакова.

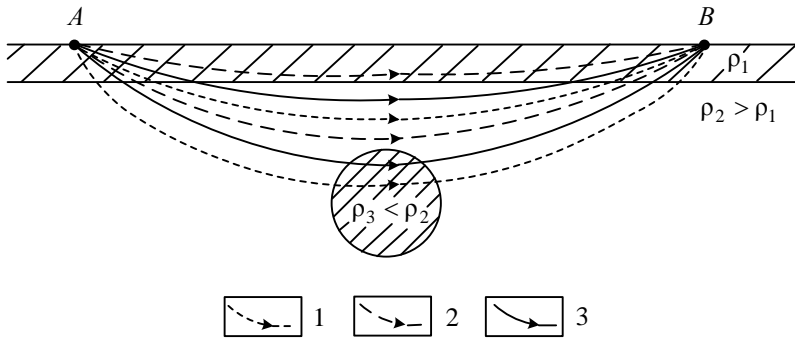


Рис. 2.38. Поведение токовых линий первичного поля в однородном полупространстве (1), в двухслойной среде (2) и в двухслойной среде в присутствии проводящего объекта (3)

На самом деле интенсивность аномалии от локального проводящего объекта в двухслойной среде уменьшается в меньшее, чем ρ_2/ρ_1 число раз. Это можно объяснить тем, что наличие проводящего объекта увеличивает эффективную продольную проводимость нижнего слоя. Поэтому натекание тока в подстилающую среду по сравнению со случаем, когда проводящий объект отсутствует, увеличивается (см. рис. 2.38). Плотность тока первичного поля на уровне объекта возрастает. Она становится промежуточной между случаями однородной и двухслойной среды. Промежуточное значение между этими случаями принимает и интенсивность аномалии. Если объект плохо проводящий, описанного уменьшения экранирующего действия верхнего слоя очевидно не будет.

Экранирующее действие верхнего слоя зависит от мощности слоя и отношения удельных сопротивлений ρ_2/ρ_1 . Для изометричного проводящего объекта величина \mathcal{E} зависит от параметра

$$c = \frac{h_1}{h} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{3/2}, \quad (2.20)$$

где h_1 – мощность верхнего слоя, h – глубина до центра объекта.

Расчеты показывают, что для симметричной и трехэлектродной установок при $L \geq 3h$ и однородного поля значения \mathcal{E} различаются не более, чем на 10-15 %. Это позволило для перечисленных случаев построить одну осредненную зависимость \mathcal{E} от c , которую можно использовать как номограмму при оценке экранирующего действия верхнего слоя (рис. 2.39). Для однополярной установки зависимость \mathcal{E} от c имеет аналогичный вид, но значения коэффициента экранирования несколько меньше (см. рис. 2.39). Размер однополярной установки при расчете номограммы принимался близким к оптимальному.

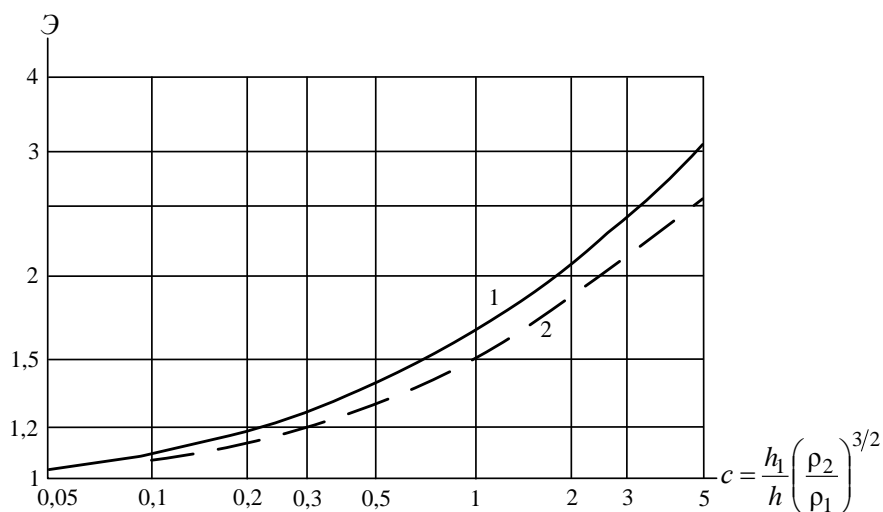


Рис. 2.39. Номограмма для оценки коэффициента экранирования:
1 — симметричная и трехэлектродная установки с $L \geq 3h$; 2 — однополярная установка

Номограммой можно пользоваться на этапе проектирования для оценки ожидаемой интенсивности аномалий. При анализе ранее проведенных работ ее можно использовать для оценки глубины опознания площади. При этом следует иметь в виду, что номограмма рассчитана для проводящего объекта, залегающего в однородной среде, перекрытой электропро-

водным слоем. В реальных условиях рудные объекты обычно имеют в несколько раз большие по размерам геоэлектрические ореолы, увеличивающие интенсивность аномалий. Поэтому полученный по номограмме коэффициент экранирования может быть завышен, а интенсивность аномалий занижена.

Если в процессе работы приемная линия перемещается относительно питающих заземлений, например, в методе срединного градиента или в методе заряда, происходит изменение глубины исследования и наблюдается эффект зондирования, как в методе ВЭЗ. Поэтому изменяется вид нормального поля. Если расстояние от точки наблюдений до источника тока $r \ll h_1$, $\rho_k \rightarrow \rho_1$. По мере удаления от источника поля кажущееся сопротивление в среде с проводящим верхним слоем растет и при $r \gg h_1$ $\rho_k \rightarrow \rho_2$. Соответственно напряженность поля изменяется от значения в однородной среде с удельным сопротивлением ρ_1 до значения в среде с сопротивлением ρ_2 .

В установке срединного градиента ρ_k по мере удаления линии MN от одного из питающих заземлений растет, достигая максимального значения в центре установки, а затем при приближении к другому питающему заземлению убывает.

Степень искажения нормального поля верхним слоем можно характеризовать коэффициентом

$$m = \frac{E_0}{E} = \frac{\Delta U_0}{\Delta U} = \frac{\rho_{k0}}{\rho_k}. \quad (2.21)$$

где E_0 , ΔU_0 и ρ_{k0} – напряженность поля, разность потенциалов и кажущееся сопротивление в однородном полупространстве с удельным сопротивлением ρ_2 ; E , ΔU и ρ_k – эти же параметры в двухслойной среде. Зная m , можно ввести поправку в измеренные значения поля:

$$E_{\text{испр}} = mE; \quad \Delta U_{\text{испр}} = m\Delta U; \quad \rho_{k\text{испр}} = m\rho_k. \quad (2.22)$$

Для вычисления коэффициента m надо знать параметры разреза – h_1 , ρ_1 и ρ_2 , которые не всегда известны. Если достаточно знать только форму исправленного графика нормального

поля, можно пользоваться относительным значением коэффициента m :

$$m_{\text{отн}} = \frac{m}{m_{\text{х.т}}}, \quad (2.23)$$

где $m_{\text{х.т}}$ – значение коэффициента m в какой-либо характерной точке. В качестве характерной точки для установки срединного градиента удобно взять центр установки. Для метода заряда можно взять точку на расстоянии H от проекции источника тока на поверхность земли (H – глубина заряда). Величина относительного коэффициента слабее зависит от параметров среды, которые в этом случае достаточно знать очень приближенно.

Рассчитав значения m или $m_{\text{отн}}$ для нужных установок и параметров разреза, можно построить номограммы и с их помощью при необходимости вводить поправку в результаты измерений по формуле (2.22). Примеры таких номограмм для установки срединного градиента и погруженного электрода приведены в работе [22].

Рассмотрим примеры влияния верхнего слоя на нормальное поле и введения поправки за это влияние. На рис 2.40, a приведен график ρ_k срединного градиента (по Н. А. Пишпаревой), полученный в Воронежской области. На участке работ кристаллический фундамент перекрыт осадочными породами платформенного чехла мощностью порядка 150 м. Измерения выполнялись с $AB=2$ км. Максимальное значение ρ_k наблюдается в центре установки. По мере приближения к питающим заземлениям кажущееся сопротивление уменьшается. Вблизи заземлений ρ_k уменьшается в 2-3 раза. Для введения поправки была использована номограмма $m_{\text{отн}}$ для $h_1/AB=0,1$ и $\rho_2/\rho_1=19$. После введения поправки левая половина графика, за исключением ближайших к заземлению 1-2 точек, превратилась в практически горизонтальную линию. В правой половине профиля график тоже практически горизонтален, но ρ_k имеет меньшую величину. Вероятно, это уменьшение ρ_k связано с переходом от изверженных пород к метаморфическим сланцам, которые имеют более низкое сопротивление по сравнению с габбро.

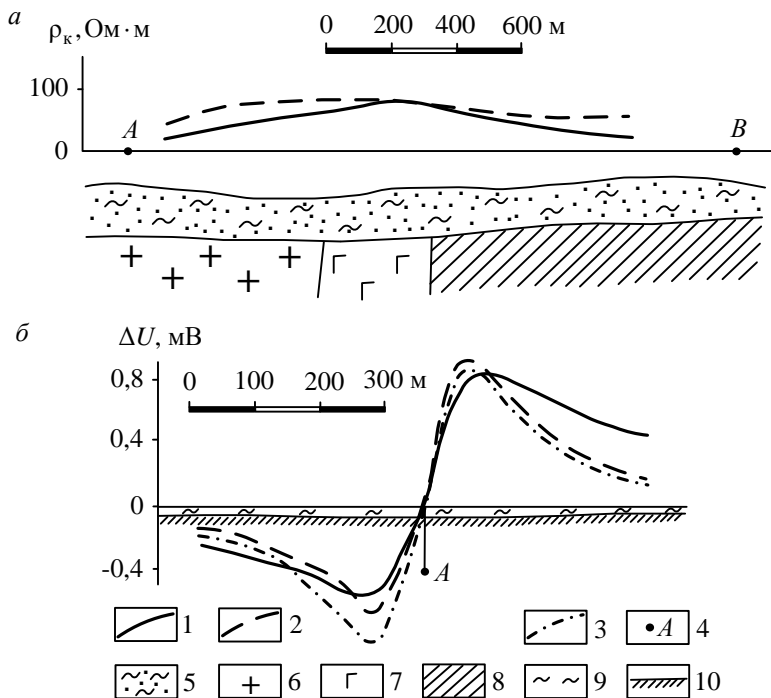


Рис. 2.40. Примеры влияния электропроводного верхнего слоя на нормальное поле:

a – установка срединного градиента; *б* – погруженный точечный электрод.
 1 – измеренные графики; 2 – графики, исправленные за влияние верхнего слоя;
 3 – график нормального поля; 4 – питающие заземления; 5 – осадочные породы платформенного чехла; 6 – граниты; 7 – габброамфиболиты; 8 – метаморфические сланцы; 9 – рыхлые отложения; 10 – кровля коренных пород (эффузивов)

Пример влияния верхнего слоя на поле погруженного электрода приведен на рис. 2.40, б. Заземление располагалось на глубине $H=100$ м. Мощность слоя рыхлых отложений 10-15 м. Измеренный график ΔU имеет сглаженную форму, экстремумы располагаются на большем расстоянии от точки перехода через нуль, чем это должно быть при глубине заряда 100 м. Особенно заметны эти искажения в правой половине профиля. При введении поправки была использована номограмма $m_{\text{отн}}$ для $h_1=0,1H$

и $\rho_2/\rho_1=19$. После введения поправки в правой половине профиля график $\Delta U_{\text{испр}}$ практически совпал с графиком нормального поля. В краевой части левой половины профиля график $\Delta U_{\text{испр}}$ также совпадает с расчетным нормальным полем. В области экстремума значения $\Delta U_{\text{испр}}$ несколько занижены по сравнению с расчетным нормальным полем. По-видимому, это вызвано влиянием какого-то проводящего объекта.

3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И МЕТОД ЗАРЯДА С ИЗМЕРЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РУДНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

3.1. Общие сведения

В потенциальных методах изучается распределение потенциала или градиента потенциала в электрическом поле неподвижных источников. Результаты измерений изображаются в виде планов изолиний потенциала или графиков потенциала. Могут изображаться результаты и в виде планов графиков градиента потенциала – графиков ΔU . К потенциальным методам относятся метод изолиний, имеющий несколько модификаций, и метод заряда. В этом разделе кроме названных методов рассматривается также метод заряда с измерением магнитного поля, который к группе потенциальных методов не относится. Но его объединяет с методами этой группы общность решаемых задач и способ представления результатов измерений в виде графиков напряженности поля (магнитной индукции), а также аналогичная конструкция питающей установки.

Применяются эти методы как для поисков и изучения локальных проводящих объектов, так и для поисков и оконтуривания геологических образований, более крупных размеров типа геоэлектрических ореолов месторождений. Объекты, имеющие повышенное удельное сопротивление, менее благоприятны. Применяются методы и для решения задач геологического картирования.

Работы производятся на постоянном токе или токе низкой частоты (до первых десятков герц). Более высокие частоты (до нескольких сотен герц) используются в методе заряда с измерением магнитного поля.

3.2. Метод изолиний

Метод изолиний был первым электроразведочным методом, начавшим применяться в нашей стране. Четкие результаты,

полученные этим методом над колчеданными месторождениями на Рудном Алтае (1924 г., А. А. Петровский) и в Красноуральском районе на Урале (1925 г., Ф. Н. Шклярский, В. Р. Бурсиан), обусловили его широкое применение при поисках таких месторождений.

В методе изолиний электрическое поле создается двумя параллельными линейными электродами разного знака. Расстояние между электродами обычно примерно равно их длине или несколько больше. При отсутствии между электродами неоднородностей среды токовые линии практически параллельны и ориентированы перпендикулярно электродам. Поэтому изолинии потенциала примерно параллельны электродам (рис. 3.1, *а*). При наличии между электродами проводящего объекта ток натекает в него. Изолинии потенциала, нормальные к линиям тока, искривляются, огибая объект (см. рис. 3.1, *б*).

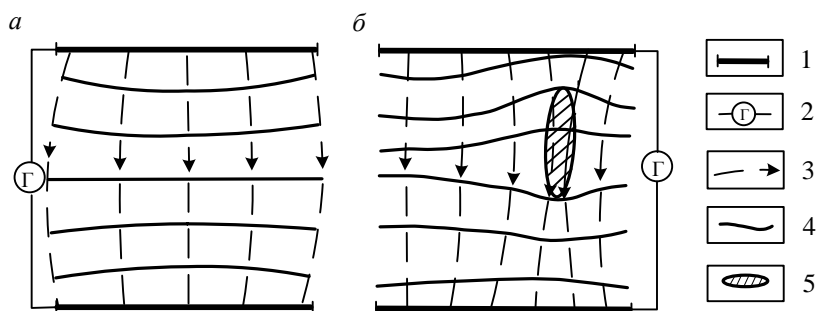


Рис. 3.1. Нормальный (*а*) и аномальный (*б*) планшеты метода изолиний: 1 – линейные электроды; 2 – генератор и подводящий провод; 3 – токовые линии; 4 – изолинии потенциала; 5 – проводящий объект

Линейные электроды устраивают с помощью неизолированного провода, разложенного на земле и заземленного через несколько метров. Для заземления используют короткие (25–30 см) стержневые электроды (шпильки). Шпильки должны располагаться так, чтобы ток стекал с линейного электрода равномерно. В противном случае первичное поле будет искажено. На фоне искаженного первичного поля аномалии плохо выде-

ляются. Для проверки равномерности стекания тока перед съемкой планшета вблизи электродов прослеживают пробные изолинии и при необходимости корректируют расположение шпилек.

Вместо линейных электродов, устройство которых и корректировка поля достаточно трудоемки, можно использовать несколько точечных заземлений, например, по три с каждой стороны планшета. В этом случае два заземления располагаются против краев планшета. Третье заземление располагается по середине и смещается во внешнюю область примерно на одну шестую часть ширины планшета (рис. 3.2). На крайних заземлениях сила тока устанавливается одинаковой. На среднем заземлении сила тока в полтора раза больше. Расстояние между системами заземлений должно быть на 30-40 % больше размера рабочей части планшета, как показано на рис. 3.2. В этом случае поле мало отличается от поля линейных электродов. Для установки нужной силы тока в цепь каждого точечного заземления необходимо включить реостат и амперметр, которые можно оформить в виде распределительного щита.

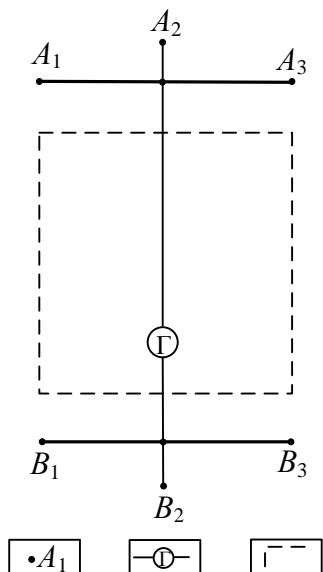


Рис. 3.2. Установка метода изолиний с точечными заземлениями:

1 – точечные заземления; 2 – генератор и подводящий провод; 3 – контур рабочей части планшета

Вместо трех точечных заземлений можно делать два и даже одно. Но тогда изолинии первичного поля будут сильнее искривлены.

Наблюдения могут выполняться как в методе заряда тремя способами: непосредственного прослеживания изолиний, измерения потенциала и измерения градиента потенциала (см. [1], ч.1, раздел 5.13). В последнем случае приемная линия ориентируется перпендикулярно линейным электродам.

На рис. 3.3 приведены результаты метода изолиний над неглубоко залегающими рудными телами, сложенными массивным колчеданом. Глубина до верхней кромки рудных тел в среднем 25 м. В данном случае, в условиях небольшой глубины залегания и резкого контакта с вмещающими породами, каждая из трех рудных линз выделяется отчетливой отдельной аномалией. Заметим, что электрическая и промежуточная линзы были открыты при проверке этих аномалий.

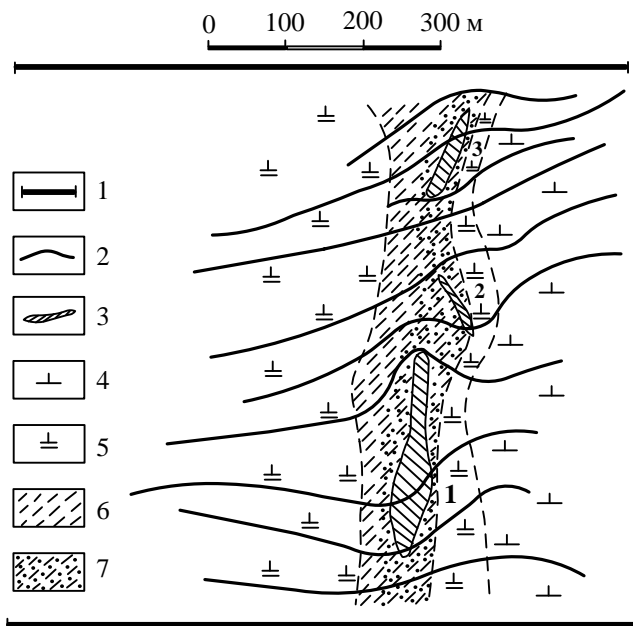


Рис. 3.3. Результаты метода изолиний на Ново-Левинском месторождении (по П. Ф. Родионову):

1 – линейные электроды; 2 – изолинии потенциала; 3 – контур рудных тел на горизонте 50 м (1 – главная, 2 – промежуточная, 3 – электрическая линзы); 4 - альбитофиры (дациты); 5 – рассланцованные альбитофиры; 6 – кварцевосерцитовые сланцы; 7 – то же с вкрапленностью пирита

В случае, когда расстояние между рудными телами мало, каждый из объектов отдельной аномалией не выделяется. В этом случае наблюдается единая аномалия от нескольких рудных тел. Характерный пример такого случая приведен на рис. 3.4.

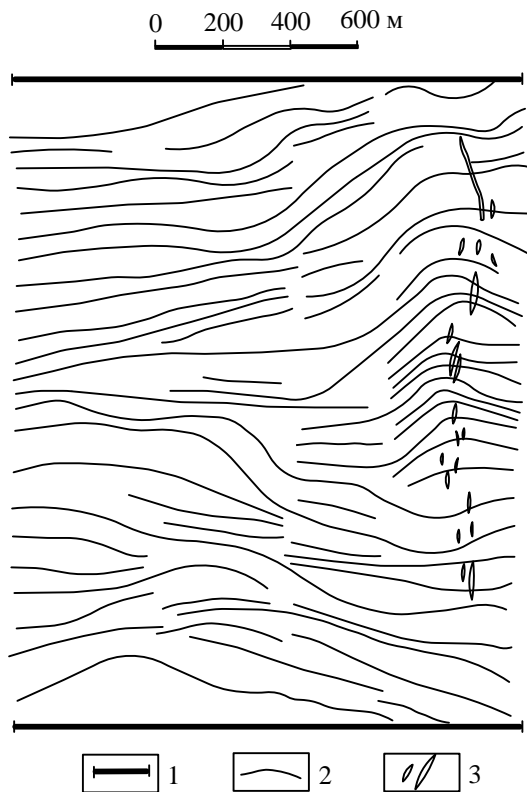


Рис. 3.4. Результаты метода изолиний на месторождении Пьянка-Ломовка (по Т. В. Дедышевой):
 1 – линейные электроды; 2 – изолинии потенциала; 3 – проекции рудных тел на поверхность земли

Месторождение, на котором снят планшет размером 2×3 км, состоит из нескольких десятков небольших сближенных

рудных тел. Ни одно рудное тело отдельной аномалией не выделяется. Все месторождение отмечается единой аномалией длиной около полутора километров. Попытка исполнителей работ выделить по мелким деталям серию аномальных осей в надежде найти в электрическом поле отражение отдельных рудных тел, как видно из рисунка, большого успеха не имела. Очевидно, рудные тела электрически связаны, и в электрическом поле, как единое целое, отражается геоэлектрический ореол месторождения вместе с расположенными в нем рудными линзами.

Технологичность и достаточно высокая производительность полевых работ, наглядность результатов и простота их интерпретации сделали во второй четверти прошлого века метод изолиний ведущим методом рудной электроразведки. В период с конца двадцатых до начала пятидесятых годов этим методом были открыты десятки месторождений на Урале и в других рудных районах страны.

Но к пятидесятым годам прошлого века фонд легко открываемых месторождений, залегающих на глубине в десятки метров, в обжитых районах оказался в значительной степени исчерпанным. Метод изолиний, глубина исследования которых не превышает четверти длины объекта по простиранию, в этих условиях потерял эффективность.

С целью преодоления возникших трудностей, наряду с разработкой новых методов были предприняты попытки модернизировать метод изолиний и родственный ему метод заряда. В результате был предложен метод компенсации и возникла идея метода изолиний с планшетами больших размеров (десятки квадратных километров) и мелкомасштабного заряда.

3.3. Методы компенсации и вертикального поля

Метод компенсации, обладающий при поисках крутопадающих и изометричных проводящих объектов повышенной, по сравнению с методом изолиний, глубиной исследования, предложен И. К. Овчинниковым [21]. В этом методе электрическое

поле создается тремя линейными электродами. Два соседних электрода имеют одинаковую полярность (рис. 3.5). Ток, стекающий со среднего (компенсирующего) электрода, препятствует току второго (дополнительного) электрода такой же полярности растекаться к третьему (собирающему) электроду, имеющему противоположный знак. Поэтому между одноименными электродами поле приобретает субвертикальную ориентировку и распространяется в более глубокие горизонты (см. рис. 3.5, *в*). У поверхности земли плотность тока мала, а максимум плотности тока располагается на некоторой глубине, как в ранее рассмотренной однополярной установке. Это и приводит к увеличению глубины исследования.

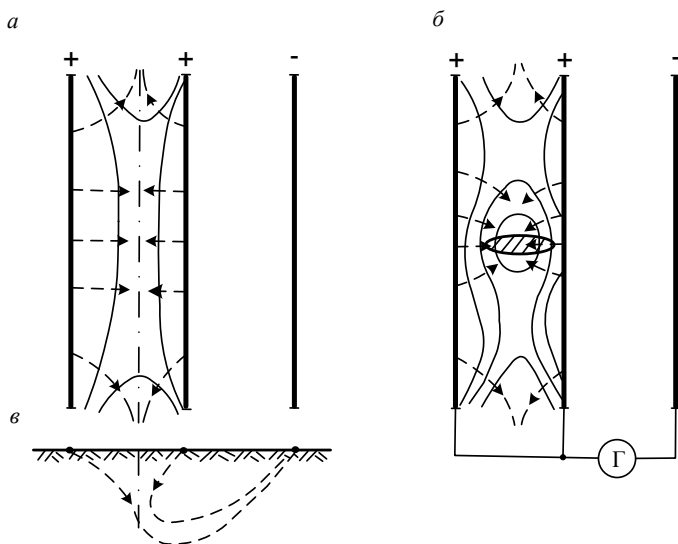


Рис. 3.5. Электрическое поле в установке метода компенсации:
a – нормальное поле; *б* – аномальное поле; *в* – токовые линии в вертикальной плоскости.
 Штрих-пунктирная линия – область компенсации. Остальные обозначения см. на рис. 3.1

В однородной среде изолинии потенциала примерно параллельны электродам. Вблизи концов электродов ток стремится вырваться из пространства между одноименными электродами. Поэтому здесь появляется большая горизонтальная

компонента поля, ориентированная вдоль электродов. Это приводит к появлению изолиний, по форме похожих на параболы (см. рис. 3.5, *а*). В этой области поле резко неоднородно и в нем объекты практически не выделяются. Поэтому длину рабочей части планшета принимают равной примерно двум третям длины электродов.

Если в пределах планшета находится проводящий объект, ток натекает в него со всех сторон и над объектом появляются замкнутые изолинии потенциала (см. рис. 3.5, *б*). Если стремление тока вырваться из пространства между одноименными электродами оказывается сильнее тенденции натекания его в проводящий объект, вместо замкнутых изолиний появляются петлеобразные изолинии, т. е. замкнутые только с одной стороны (вторая от центра изолиния на рисунке).

Наибольшей чувствительностью к проводящим объектам поле обладает в области компенсации, где плотность тока на поверхности земли близка к нулю. Поэтому область компенсации не должна быть прижата к одному из электродов, а располагаться в средней части планшета. Регулировать ее положение можно изменением соотношения силы тока на одноименных электродах. Обычно сила тока на компенсирующем электроде в 3-4 раза больше, чем на дополнительном электроде. Имеет значение и расстояние между компенсирующим и собирающим электродами. Наилучшие результаты получаются, когда это расстояние примерно вдвое больше расстояния между электродами одинакового знака. Важное значение имеет равномерность стекания тока с электродов. Чтобы обеспечить выполнение этого условия электроды делают секционированными. Каждая секция питается по отдельной жиле кабеля. Для установки нужной силы тока в цепь каждой жилы включается амперметр и реостат.

На рис. 3.6 приведен планшет метода компенсации, снятый на Султановском колчеданном месторождении (Челябинская область). Месторождение залегает в измененных альбитофирах (дацитах). Эффузивные породы палеозоя перекрыты проводящими мезокайнозойскими отложениями мощностью до

100 м. Южная часть месторождения была открыта случайной скважиной, бурившейся с целью поисков бокситов. После этого на участке были проведены работы по методу изолиний. Известное оруденение отметилось слабой аномалией. На остальных планшетах поле оказалось нормальным.

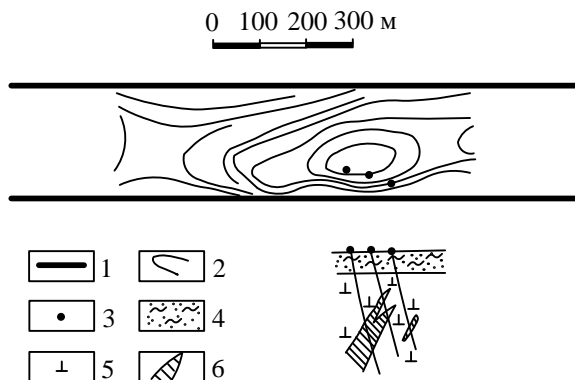


Рис. 3.6. Результаты метода компенсации на Султановском колчеданном месторождении (по И. К. Овчинникову):

1 – линейные электроды; 2 – изолинии потенциала; 3 – скважины; 4 – рыхлые мезокайнозойские отложения; 5 – альбитофиры (дациты); 6 – рудные тела

Так как по геологическим представлениям рудоносная зона должна была продолжаться в северном направлении, решено было исследовать участок методом компенсации. Известное рудное тело проявилось интенсивной аномалией в виде изометричных замкнутых изолиний. На примыкающем с севера планшете поле было нормальным, а на трех следующих планшетах выявились аномалии в виде замкнутых изолиний, вытянутых вдоль электродов. Такая форма аномалий свидетельствует о достаточно большой глубине залегания объектов. При проверке аномалий бурением на всех их были встречены рудные тела. На рис. 3.6 приведен самый северный из трех упомянутых аномальных планшетов.

Из-за громоздкости установки, состоящей из трех линейных электродов, и сложности выбора соотношения силы токов на одноименных электродах метод компенсации применялся в небольших объемах. Работники производственных организаций

проводили работы только при консультации автора этого метода. Поэтому Г. П. Саковцевым и автором была предложена упрощенная модификация, названная методом вертикального поля. В этой модификации электрод противоположной полярности относится на достаточно большое расстояние (не меньше длины электродов) перпендикулярно электродам и делается точечным. Токи на линейных электродах устанавливаются одинаковыми. В этом случае область компенсации располагается примерно посередине между линейными электродами. Иногда, при сильном влиянии удаленного электрода, ток на линейном заземлении, расположенном со стороны этого электрода, устанавливается на несколько десятков процентов больше.

В такой упрощенной модификации метод стал использоваться производственными организациями. На Урале им было обследовано более 100 км². Применялся он также на Алтае. В результате этих работ были открыты несколько месторождений на участках, до этого уже изучавшихся электроразведкой. В числе их северная часть Комсомольского месторождения, в которой сосредоточена основная часть запасов (район г. Медногорска), прослежена северная, более глубокая часть Ново-Шайтанского месторождения, тогда еще не разведанная (Кировградский район), Светлореченское месторождение (Полевской район) и др.

Компенсационные методы из-за необходимости устройства линейных заземлений большой длины достаточно трудоемки и их использование для изучения значительных площадей в современных условиях вряд ли возможно. Но в некоторых случаях для опознания небольших участков они могут оказаться полезными.

3.4. Применение установок больших размеров для поисков геоэлектрических ореолов месторождений

Установление наличия электропроводных геоэлектрических ореолов у колчеданных и некоторых других рудных месторождений привело к идее использования метода изолиний с

планшетами больших размеров. При съемке таких планшетов площадью несколько десятков километров вся совокупность рудных тел вместе с геоэлектрическим ореолом проявляется в электрическом поле как единый проводящий объект. Эта идея может быть реализована также в методах мелкомасштабного заряда и срединного градиента.

Чтобы объект хорошо проявлялся в электрическом поле, размер планшета (разнос питающих электродов) должен превышать его по крайней мере в 2-3 раза. На колчеданных месторождениях Среднего Урала электропроводные зоны имеют длину в среднем 2-2,5 км. Следовательно, размер планшета по направлению простирания пород должен быть не меньше 5-6 км. С учетом размеров объекта нет необходимости в густой сети наблюдений. Излишняя детальность даже затрудняет выделение крупных аномалий. Наиболее подходящий масштаб 1:25000 или 1:50000. При съемке изолиний вполне достаточно прослеживать их через 200-250 м при расстоянии между точками на изолинии порядка 50 м. Соответствующая сеть должна использоваться и при количественных измерениях.

На рис. 3.4 был приведен планшет изолиний размером 2×1,5 км на месторождении, состоящем из нескольких десятков небольших рудных тел. Ни одно из рудных тел не проявляется в виде отдельной аномалии. В совокупности они вызывают общую аномальную зону, протягивающуюся через весь планшет. По всей вероятности если бы планшет имел бóльшие размеры аномалия имела бы бóльшую протяженность, особенно в северном направлении.

Этот же планшет приведен на рис. 3.7, но на нем убрана часть изолиний. Расстояние между оставшимися изолиниями составляет 200-250 м. При меньшей детальности съемки аномалия, вызванная месторождением, проявляется не менее отчетливо, чем при густой сети наблюдений, и потери информации не наблюдается.

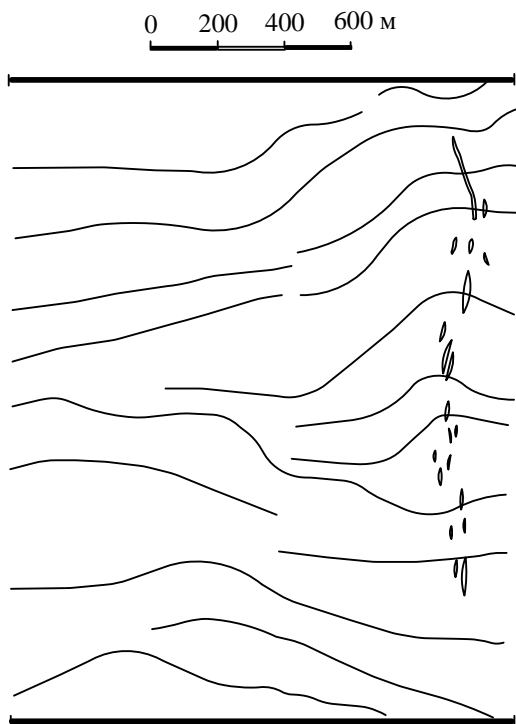


Рис. 3.7. Тот же, что на рис. 3.4, планшет на месторождении Пьянка-Ломовка при расстоянии между изолиниями потенциала 200-250 м

Для оценки эффективности метода изолиний с большими планшетами и отработки методики таких исследований на участке Калугинского колчеданного месторождения (Нижне-Туринский район) были выполнены работы на планшете с рабочей площадью размером 7×4 км. Фрагмент этого планшета приведен на рис. 3.8. Для создания электрического поля с каждой стороны устраивались по три точечных заземления, как показано на рис. 3.2. Расстояние между парами крайних заземлений составляло 10 км. Средние заземления были вынесены во внешнюю область на 1,2 км. Сила тока на средних заземлениях была в полтора раза больше, чем на крайних. Как следует из ри-

0 100 200 300 м

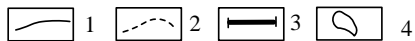
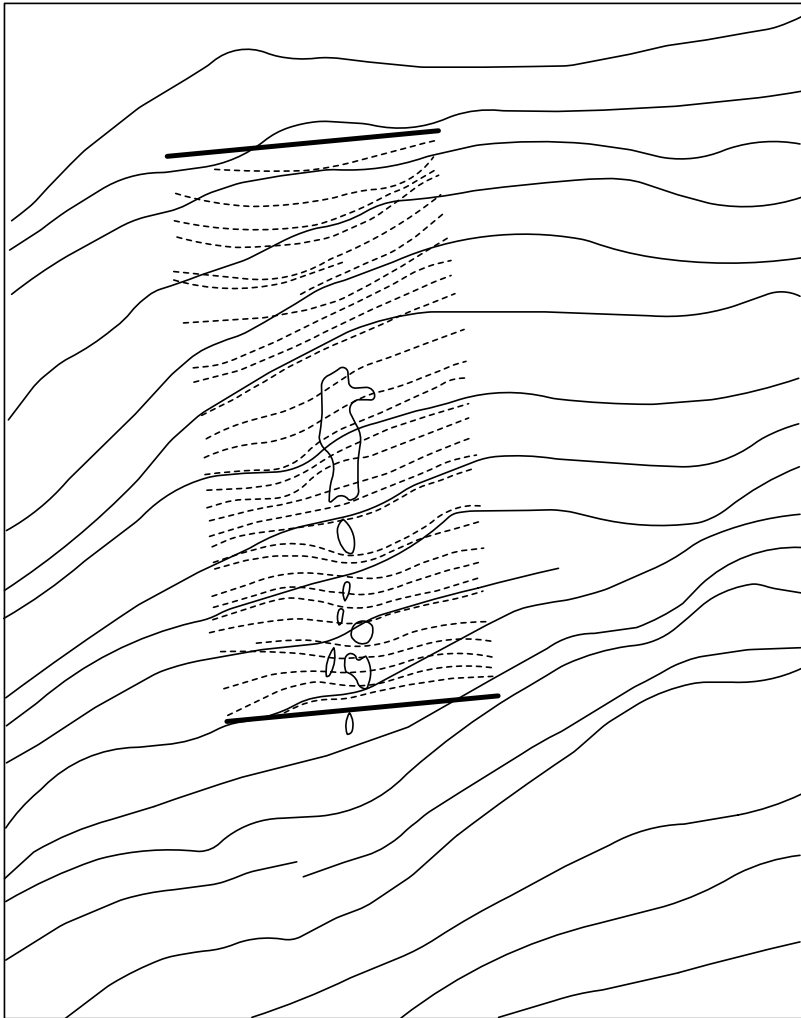


Рис. 3.8. Фрагмент планшета метода изолиний больших размеров на Калугинском месторождении:

1 – изолинии потенциала планшета 10x4 км; 2 - изолинии потенциала планшета 2x1 км (по Н. В. Наконечному); 3 - линейные электроды; 4 – контуры рудных тел

сунка, при такой системе заземлений характер поля не хуже чем при использовании линейных электродов.

Над месторождением получена отчетливая аномалия длиной около 1,5 км при ширине 700-800 м. Стрела прогиба изолиний достигает 200-250 м, т. е. аномалия весьма интенсивная. Длина собственно рудной зоны 700 м. Рудные тела располагаются в средней части аномалии (см. рис. 3.8). В других частях планшета подобных аномалий получено не было. Таким образом, на площади около 30 км² получена лишь одна отчетливая аномалия, по которой устанавливается положение месторождения.

Ранее на месторождении выполнялись работы на планшетах меньших размеров. Один из них размером 2×1 км приведен на рис. 3.8. На нем средняя часть месторождения отмечается достаточно интенсивной аномалией. К югу интенсивность аномалии уменьшается. Северная половина наиболее крупного рудного тела, где глубина до верхней кромки оруденения увеличивается с 20 до 100 м, в электрическом поле не проявляется.

При замене линейных электродов на точечные появляется возможность вычисления коэффициента установки и расчета кажущегося сопротивления. На плане изоом по-видимому, будут более уверенно определяться границы аномалий и выявляться их внутренняя структура. Если наблюдения выполняются путем прослеживания изолиний, чтобы иметь возможность рассчитывать ρ_k , достаточно по одному или нескольким профилям измерить ΔU и придать изолиниям количественные значения потенциала.

Подобный опыт был проведен геофизиками Тагильской геологоразведочной экспедиции на участке южнее Кабанской группы месторождений (Верхне-Туринский район). Работы выполнялись с установкой срединного градиента, ориентированной по простиранию пород. Разнос AB был 6 км. Измерения выполнялись способом градиента потенциала по сети 250×50 м по профилям, ориентированным вкрест простирания пород. Приемная линия ориентировалась по простиранию пород, т. е.

вкрест профилей. При такой методике работ были неизбежны погрешности ориентировки приемной линии, что вносило погрешности и в результаты определения ρ_k . Поэтому, а также для уменьшения влияния колебаний ρ_{MN} , при обработке производилось осреднение значений ρ_k по семи точкам.

Фрагмент плана изоом на описываемом планшете приведен на рис. 3.9. На этом участке на фоне кажущихся сопротивлений 3000 Ом·м и выше изолинией с отметкой 2000 Ом·м оконтуривается аномалия размером $2 \times 1,5$ км, в пределах которой ρ_k уменьшается до 1000 Ом·м. Для проверки аномалии пробурены две скважины. Скважина 1 на глубине около 150 м встретила массивный серный колчедан, скважина 2 прошла по зоне сульфидной вкрапленности (см. рис. 3.9, б). В результате этих работ было открыто рудопроявление, получившее название Кудрявокаменского.

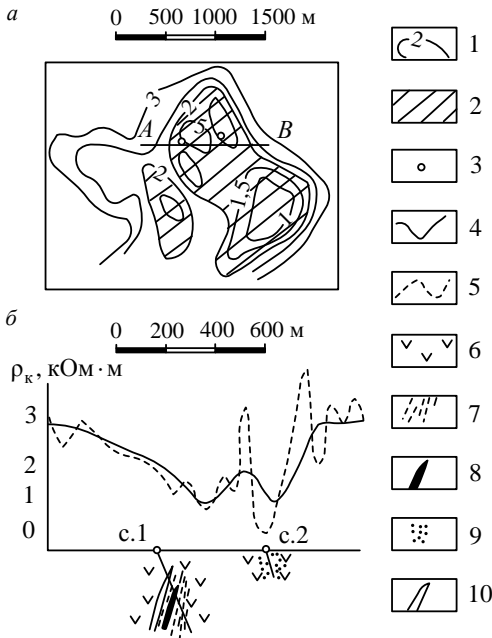


Рис. 3.9. Результаты наблюдений по методу среднего градиента с установкой, ориентированной по простиранию пород, $AB=6$ км (по В. Е. Каплану и Б. Н. Курушину):

a – фрагмент плана изоом, оцифровка в кОм·м; *б* – график ρ_k и геологический разрез по линии AB 1 – изолинии ρ_k ; 2 – область с $\rho_k < 2$ кОм·м; 3 – скважины; 4 – осредненный график ρ_k ; 5 – график измеренных значений ρ_k ; 6 – андезитодацитовые порфириды; 7 – кварцевосерицитовые сланцы; 8 – массивный колчедан; 9 – вкрапленность сульфидов; 10 – дайка плагиигранитов

При использованной методике трудно избежать погрешностей в ориентировке приемной линии. Но даже если удастся добиться точной ориентировки линии MN относительно пита-

ющей линии, останется неизвестной ориентировка ее относительно электрического поля. Колебания угла между приемной линией и направлением поля могут существенно исказить распределение ρ_k . По-видимому, одним из вариантов методики может быть измерение ΔU по направлению профилей с последующей увязкой и вычислением потенциала. По построенному затем плану изолиний потенциала можно определять значения ΔU между изолиниями и рассчитывать ρ_k по направлению поля. Для уменьшения влияния мелких неоднородностей среды размер приемной линии следует брать достаточно большим, по-видимому, порядка 200-250 м.

В заключение можно заметить, что кроме описанных планшетов на Среднем Урале Тагильской геологоразведочной экспедицией в содружестве со Свердловским горным институтом были сняты еще два планшета изолиний площадью порядка 50 км² каждый. На них были выявлены несколько аномалий, которые из-за ситуации, сложившейся в геологоразведочной службе в девяностых годах, до сих пор детально не изучены и не проверены.

3.5. Методы заряда с измерением электрического и магнитного поля

Значительно шире идея поисков месторождений через их геоэлектрические ореолы реализовывалась в методе мелкомасштабного заряда. Эта методика разрабатывалась в семидесятые годы прошлого века на Алтае (М. В. Семенов и др.). Метод применялся для изучения строения рудных полей, в первую очередь для поисков новых ветвей рудного поля еще не вскрытых скважинами [31]. При этом заряд осуществлялся в рудную зону (не обязательно непосредственно в рудное тело). На Урале такие работы сыграли существенную роль в оценке перспектив Подольского участка (Башкирия).

Подобные исследования иногда выполняются и при заряде в скважины, не встретившие электропроводных зон, с целью поисков таких объектов в районе заряда. В этом случае по

своим задачам и возможностям метод заряда не отличается от рассмотренного выше метода изолиний с большими размерами планшета. При поисках незаряженных проводящих объектов, не имеющих электрической связи с зарядом, преимущества погруженного источника тока сохраняются лишь на небольшом расстоянии от скважины, не превышающем глубины расположения заземления [21].

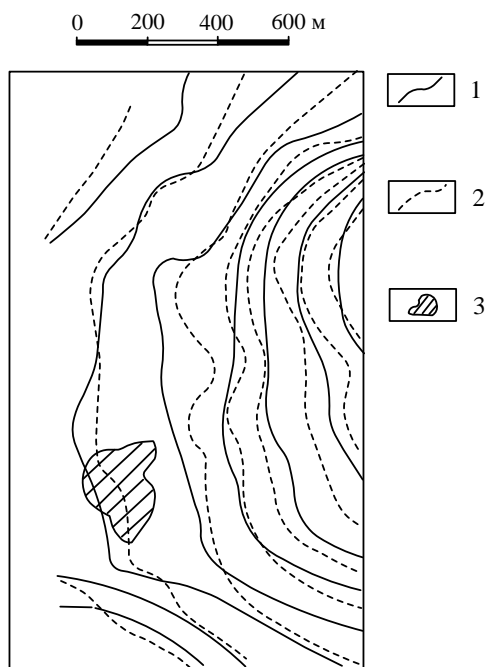


Рис. 3.10. Фрагмент плана изолиний по методу заряда на участке Озерного месторождения (по А. П. Калташеву):

1 – изолинии потенциала в поле заряда на глубине 390 м; 2 – то же в поле заряда у устья скважины; 3 – проекция рудного тела

которой располагается рудное тело, имеющее поперечник порядка 400 м. Очевидно, в подобных случаях нет необходимости ставить проведение исследований в зависимость от наличия глубоких скважин. Задача поисков электропроводных блоков

Для иллюстрации этого положения на рис. 3.10 приведены результаты метода заряда на участке Озерного месторождения. Заряд располагался на глубине 390 м в скважине, расположенной на расстоянии несколько больше двух километров северо-восточнее месторождения. Затем измерения были повторены при расположении заряда на поверхности земли около устья скважины. Планы изолиний потенциала при обоих положениях заряда оказались идентичными. В обоих случаях на них отчетливо выявляется электропроводная зона длиной около 1,5 км, в южной части

может быть решена и при расположении заземлений на поверхности земли.

Другой пример результатов метода заряда со значительной площадью исследования приведен на рис. 3.11. Заряд располагался на глубине 400 м по вертикали в полосе рудовмещающих кварцевосерицитовых сланцев, падающих на восток под углом 75° . Высокая анизотропия сланцев ($\lambda > 2,9$) обусловила эллиптичность изолиний потенциала в нормальном поле. Резкое сгущение изолиний в восточной части приведенного фрагмента вызвано влиянием контакта с расположенной на востоке полосой графитизированных пород.

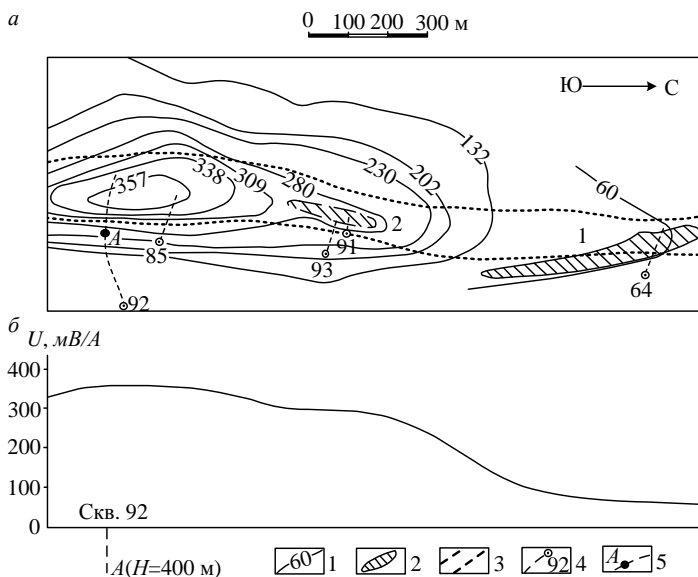


Рис. 3.11. Фрагмент плана изолиний по методу заряда (а) и графика потенциала (б) на Чусовском месторождении:

1 – изолинии потенциала, оцифровка мВ/А; 2 – проекции рудных тел: 1- Чусовское месторождение, 2 – Южно-Чусовское (показано схематично); 3 – контур рудовмещающих кварцевосерицитовых сланцев; 4 – скважины и их проекции; 5 – проекция точки заряда

Смещение эпицентра к северу от проекции заряда вызвано, по-видимому, влиянием зоны обильной вкрапленности сульфидов, встреченной скважиной 85. В полукилометре север-

нее зарядной скважины изолиния с отметкой 280 образует длинную узкую петлю, оконтуривающую Южно-Чусовское месторождение. Оно состоит из нескольких небольших рудных тел, встреченных скважинами 91 и 93, а также некоторыми другими скважинами, не показанными на рисунке.

Далее на север на протяжении по крайней мере 300 м электрическое поле нормально. Затем изолиния с отметкой 60 резко, почти на полкилометра, отклоняется на север, оконтуривая рудную зону Чусовского месторождения. К сожалению, электрическое поле в северной части площади детально не изучено, так как к моменту проведения работ Чусовское месторождение было уже разведано и в проведении на нем дополнительных исследований не было практической необходимости.

Рудные зоны месторождений четко проявляются на графике потенциала, построенного по оси плана изолиний (см. рис. 3.11, б). После области максимума, где качественно график соответствует нормальному полю, наблюдается резкое его выполаживание. Этот участок, где график практически параллелен оси абсцисс, соответствует рудной зоне Южно-Чусовского месторождения. После этого наблюдается быстрое уменьшение потенциала, а затем график снова резко выполаживается, отмечая рудную зону Чусовского месторождения.

В рассмотренном примере заряд располагался в одной проводящей зоне с рудными объектами. Это обусловило большую интенсивность аномалий. Значительную роль, по-видимому, сыграло также наличие вокруг рудных тел геоэлектрических ореолов, в которых по данным петрофизических исследований удельное сопротивление пород уменьшается в 2,5-3 раза.

Метод заряда с измерением электрического поля, как было показано, имеет высокую эффективность, но изучение с его помощью больших площадей затруднено из-за необходимости удаления второго заземления на большое расстояние, в несколько раз превышающее размер планшета. Это требует раскладки провода длиной обычно не менее 10 км. Более технологичен метод заряда с измерением магнитного поля (МЗМП). В

этом случае отпадает необходимость в устройстве удаленного питающего заземления. Оба заземления могут быть расположены в одной скважине. Установку с удаленным заземлением иногда используют только при крупномасштабном заряде.

Типы установок без удаленного заземления различаются взаимным расположением заряда A и второго питающего заземления B . Заряд располагается в проводящем интервале (в рудном теле, в зоне вкрапленной минерализации или измененных пород и т. п.). Заземление B располагается в той же скважине или вблизи ее устья на поверхности земли. Наиболее эффективна установка, в которой заземление B располагается ниже заряда (рис. 3.12, a). В этом случае интенсивность магнитного поля тока, стекающего с заземления B и протекающего по подводящему проводу, минимальна, а главное, меньшее влияние оказывают неоднородности приповерхностного слоя. К сожалению условия для применения такой установки встречаются редко, так как скважины после пересечения перспективной на оруденение зоны обычно закрываются.

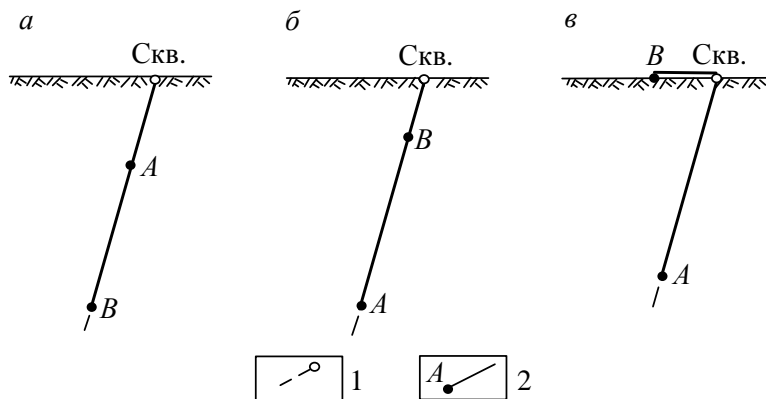


Рис. 3.12. Типы двухэлектродных установок метода заряда с измерением магнитного поля:

1 – устье и ствол скважины; 2 – питающее заземление и подводящий провод

Чаще всего второе заземление приходится располагать выше заряда (см. рис. 3.12, $б$). Если глубина скважины невелика, а иногда и при работе в глубоких скважинах, это заземление

располагается на поверхности земли возле устья скважины. В этом случае в качестве заземления можно использовать обсадную трубу. В случае наклонной скважины это заземление часто располагают не у устья скважины, а в точке проекции заряда на поверхность земли (см. рис. 3.12, в).

Во всех случаях расстояние между заземлениями A и B должно быть не меньше одной четверти глубины расположения заряда A .

Для измерений может быть использована любая низкочастотная аппаратура, позволяющая измерять магнитное поле нужной частоты, например, Лазурит (измеряет напряженность магнитного поля) или АМЗ (измеряет магнитную индукцию) [4]. Для аэроварианта МЗМП в Институте геофизики УрО РАН разработана аппаратура АММЗ. Эта аппаратура позволяет выполнять трехкомпонентные измерения – B_z , B_x , B_y . Могут быть отдельно измерены вещественная и мнимая компоненты поля. Рабочие частоты 19,5, 78 и 312,5 Гц.

В МЗМП электрическое поле в земле создается токами, стекающими с питающих заземлений, а также вихревыми токами, индуцируемыми током, протекающим по кабелю. Эти токи натекают в более проводящие участки геоэлектрического разреза, образуя зоны концентрации, в которых плотность тока увеличивается. Эти зоны создают аномальное магнитное поле, качественно похожее на поле линейного тока. По вертикальной компоненте поля B_z эти зоны отмечаются нулевыми значениями. По обе стороны от нулевых значений наблюдаются экстремумы B_z противоположного знака. Аппроксимируя зоны концентрации тока линейными токами, можно оценить глубину до них, как половину расстояния между экстремумами B_z . На графиках и планах изолиний B_x зонам концентрации тока соответствуют экстремумы.

Рассмотрим характер аномалий МЗМП на простом примере крупномасштабной съемки над одиночным колчеданным рудным телом. Заряд был сделан в вертикальной скважине 1842 на глубине 80 м в южный конец горизонтально залегающего рудного тела. Геологический разрез месторождения приведен на

рис. 1.8 и 1.10. Второе заземление располагалось у устья скважины. Измерения выполнялись аппаратурой АМЗ-2 на частоте 78 Гц.

Рудное тело отмечается линией нулевых значений B_z . Слева от нее наблюдается область положительных значений B_z , справа – отрицательных (рис. 3.13). Следовательно, в зоне концентрации ток протекает в северном направлении, т. е. вдоль рудного тела. Расстояние между центрами положительной и отрицательной аномалий B_z около 160 м, т. е. глубина до оси зоны концентрации тока около 80 м, что хорошо согласуется с глубиной до рудного тела.

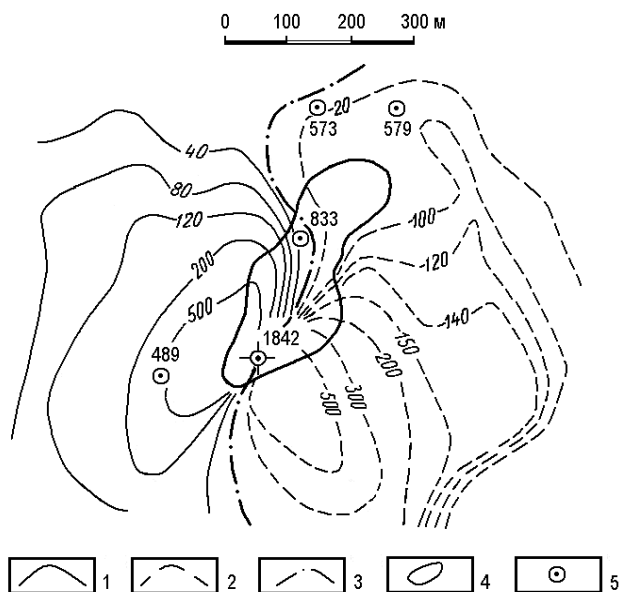


Рис. 3.13 Результаты МЗМП на месторождении Таш-Тау (по В. В. Кормильцеву и В. Д. Семенову).

Заряд в скв. 1842, $H = 80$ м. Заземление B на устье скважины.

1 - изолинии B_z (в нТл) положительные; 2 - то же отрицательные; 3 - то же нулевая; 4 - контур рудного тела; 5 - скважины

На севере аномалия прослеживается несколько дальше выклинки рудного тела. Это связано с неточностью показанного его контура. В скважинах 573 и 579 имеются рудные подсечения, т. е. рудное тело продолжается дальше на север и просле-

живается от профиля скважины 833 примерно на 250 м, несколько отклоняясь к западу (см. рис. 1.9), что и фиксируется МЗМП. Этим, а также неоднородностью вмещающих пород (севернее скважины 833 проходит субширотная низина) объясняется и изгиб нулевой линии.

На рис 3.14 приведен пример мелкомасштабного заряда с измерением магнитного поля в аэроварианте, выполненного в окрестностях отработанного в настоящее время колчеданного месторождения им. XIX Партсъезда. Участок располагается в 20 км южнее г. Учалы. Заряд осуществлялся в скважину 5726 на глубину 1060 м, второе заземление располагалось у устья скважины. Площадь планшета составляла около 20 км². Измерения производились на частоте 78 Гц. Высота полета 100 м.

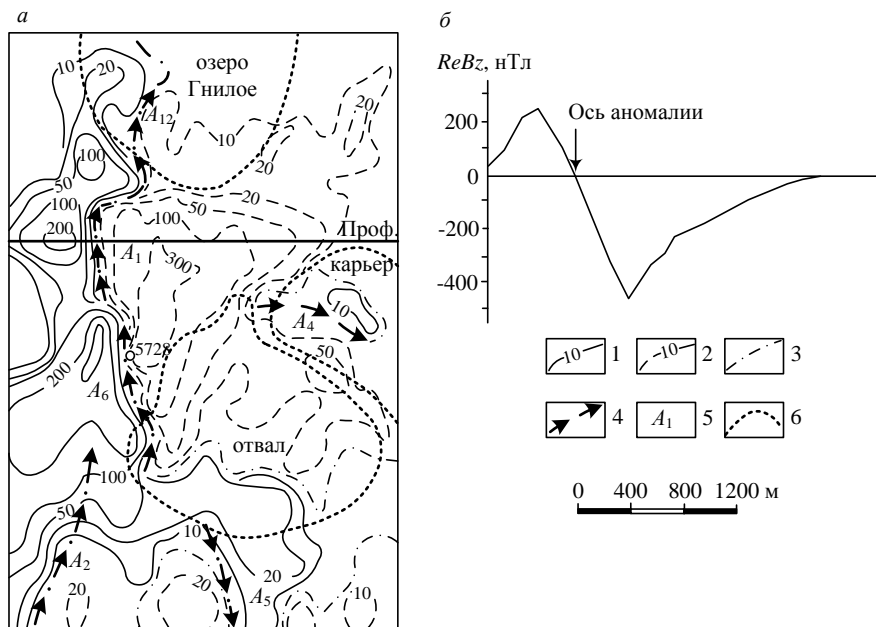


Рис. 3.14. Фрагмент плана изолиний ReB_z аэроварианта заряда с измерением магнитного поля (а) и график ReB_z по профилю (б). Заряд в скв. 5725, $H_A=1060$ м, $H_B=0$. Высота полета 100 м. (По материалам лаборатории электротометрии Института геофизики УрО РАН)

1-3 – изолинии ReB_z : 1 – положительные; 2 – отрицательные; 3 – нулевые; 4 – оси зон концентрации токов (они же оси аномалий); 5 – номера аномалий; 6 – контуры озера, карьера и отвала

На исследованной площади выявлены 12 аномалий. Часть из них располагается за пределами показанной на рисунке части планшета. Через устье зарядной скважины в субмеридиональном направлении протягивается цепочка аномалий. Аномалией А6 отмечается геоэлектрический ореол так называемого подотвального рудного тела. Связывать аномалию с самим рудным телом, залегающим на глубине 470м, нельзя, так как глубина до оси зоны концентрации тока, определенная по расстоянию между экстремумами B_z , в несколько раз меньше.

У северной границы участка под озером Гнилое выявлена аномалия А12. Здесь бурением установлено несколько рудных мелких тел, залегающих на небольшой глубине. Между названными аномалиями располагается аномалия А1, которую следует считать перспективной на оруденение. По расстоянию между экстремумами B_z , составляющему 650 м (см. рис. 3.14, б), с учетом высоты полета глубину до оси зоны концентрации тока можно оценить в 225 м.

В южной части планшета аномальная зона раздваивается. Восточная ее ветвь, образованная аномалией А5, отмечает северное окончание полосы рудовмещающих пород Узельгинского месторождения, расположенного южнее. Смещенную к западу аномалию А2 также можно полагать представляющей интерес, учитывая ее положение практически на продолжении известной рудной зоны.

Аномалия А4, располагающаяся над карьером отработанного месторождения, вызвана измененными рудовмещающими породами и остатками нижних частей выработанных рудных тел. Необычная ориентировка аномальной оси объясняется расположением объекта относительно заряда, а также тем, что месторождение состоит из нескольких рудных тел, смещенных одно относительно другого не только в меридиональном, но и в широтном направлении.

Приведенные примеры показывают эффективность метода заряда с измерением магнитного поля. Этим методом выявляются как непосредственно рудные тела, так и зоны измененных пород, т. е. геоэлектрические ореолы месторожде-

ний. Последнее положение свидетельствует о целесообразности использования мелкомасштабного МЗМП, предпочтительно в аэроварианте, для опоскования больших площадей с целью выявления крупных проводящих зон, которые могут соответствовать рудным полям.

4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

4.1. Модификации электрохимических методов

В электрохимических методах изучаются электрические поля, вызванные поляризацией среды и ее отдельных элементов. Поляризация может быть естественной или искусственной. Изучение естественной поляризации производится в методе естественного поля. Этот метод достаточно подробно рассматривается в общем курсе электроразведки [13, 23 и др.]. В данном разделе описываются методы, в которых изучаются поля вынужденно поляризованных тел под действием приложенного электрического поля. В эту группу входит метод вызванной поляризации, также изучающийся в общем курсе. Здесь он будет рассмотрен более подробно.

Метод вызванной поляризации (ВП), как и большинство методов электроразведки, имеет две основных разновидности – профилирование и зондирование. В свою очередь профилирование применяется в нескольких вариантах, в зависимости от типа используемых установок. Наиболее часто применяется профилирование с установкой срединного градиента (ВП-СГ) В условиях труднодоступной местности, если можно ограничиться небольшой глубиной исследования, используется профилирование с симметричной установкой. При поисках маломощных крутопадающих поляризующихся объектов пониженного сопротивления эффективна установка комбинированного профилирования (КЭП-ВП). От данных КЭП-ВП можно перейти к результатам профилирования с однополярной установкой. Применяется также профилирование с дипольными установками. Могут быть вариации и в методике зондирования.

Специфической разновидностью метода вызванной поляризации является модификация, в которой изучаются ранние стадии процесса – РСВП.

Метод контактной съемки поляризационных кривых (КСПК) также основан на изучении поляризации объекта под

действием электрического тока. Но в силу своей специфики он не может рассматриваться как модификация метода ВП.

4.2. Метод вызванной поляризации в модификациях срединного градиента и симметричного профилирования

В установке срединного градиента, по крайней мере, в средней ее части, первичное поле близко к однородному. Аномалии в таком поле имеют наиболее простой вид. Модификация технологична, так как при одном положении питающей линии обследуется значительная площадь, и переносить тяжелые питающие заземления, обычно состоящие из многих электродов, приходится редко, иногда даже не каждый день.

Измерения обычно выполняют не на всем интервале профиля, а только в средней его части. Вблизи питающих заземлений оставляют участок, на котором измерения не производятся. Длина этого участка тем больше, чем больше мощность рыхлых отложений и чем меньше их сопротивление. Это делается из-за того, что на малом расстоянии от заземлений глубина исследования уменьшается. Рабочая часть профиля составляет от $AB/3$ до $0,8 AB$. В средних условиях принимают длину рабочей части профиля равной $AB/2$. Кроме профиля, проходящего через питающие заземления AB , измерения выполняют на параллельных профилях. Максимальное удаление профилей от питающей линии $0,25 AB$ [11].

В. А. Комаров оспаривает это методическое положение, предлагая выполнять измерения на всем интервале AB [16]. Но из приведенных в той же книге результатов расчетов следует, что вблизи объекта даже в однородной среде интенсивность аномалии заметно уменьшается. При наличии электропроводного приповерхностного слоя ослабление аномалии будет больше. Кроме ослабления аномалий от локальных объектов в двухслойной среде, при приближении к питающим заземлениям изменяется вид графика нормального поля, что может привести к некоторому усложнению интерпретации.

На рис. 4.1, *a* приведен график зависимости η_k в двухслойной среде от расстояния между точкой наблюдений и питающим заземлением. Отношение удельных сопротивлений нижнего и верхнего слоев принято равным 19. Такого порядка отношение ρ_2/ρ_1 характерно для многих рудных районов. Когда отношение L/h_1 (L – расстояние до питающего заземления) становится меньше 20-25, при приближении точки наблюдений к питающему электроду η_k быстро уменьшается, стремясь к поляризуемости верхнего слоя η_1 . На таком фоне выделение локальных аномалий небольшой интенсивности может оказаться затруднительным. Если известны параметры двухслойной среды, можно исправить нормальное поле по методике, аналогичной описанной в разделе 2.17 для кажущегося сопротивления.

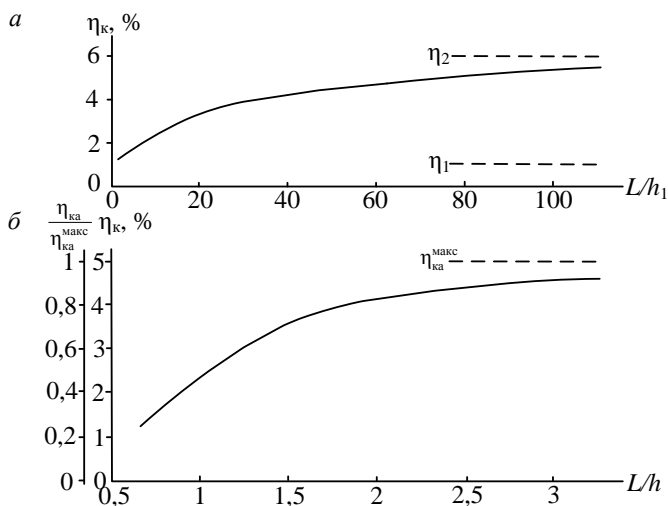


Рис. 4.1. Графики зависимости η_k от расстояния между точкой наблюдений и питающим заземлением:

a – двухслойная среда: $\rho_2=19\rho_1$, $\eta_2=6\%$, $\eta_1=1\%$;

б – шар в однородной среде: $\eta_{изб}=20\%$, $h_1=1,5a$ (a – радиус шара), h – глубина до центра шара

Зависимость аномалии, вызванной локальным объектом, от расстояния до питающего заземления на примере шара в однородной среде иллюстрируется рисунком 4.1, *б*. В приведенном

примере при расстоянии до источника поля равном 1,5 глубины до центра объекта аномалия уменьшается на 30% по отношению к максимально возможной ее величине, когда расстояние до питающего заземления велико. При наличии электропроводного приповерхностного слоя ослабление аномалии при приближении к питающему электроду будет больше.

Если объект не выходит на поверхность земли амплитуда аномалии зависит от размера питающей установки. При горизонтальной ориентировке первичного поля максимальной величины интенсивность аномалии η_k , как и аномалии ρ_k , достигает в случае однородного поля, т. е. при очень большом разnose AB . Чтобы амплитуда аномалии не сильно отличалась от максимально возможной, надо оценивать минимально необходимую величину разноса AB . Это можно сделать по формуле [11]:

$$AO \geq \frac{AB}{2} = 5h_2 \left(1 + \frac{h_1}{h_1 + h_2} \frac{\rho_2}{\rho_1} \right). \quad (4.1)$$

где h_1 – мощность верхнего слоя; h_2 – глубина до верхней кромки объекта; ρ_1 – удельное сопротивление верхнего слоя; ρ_2 – удельное сопротивление подстилающей среды. При выполнении этого условия в средней части интервала AB , где первичное поле близко к однородному, интенсивность аномалии η_k не сильно отличается от максимально возможной.

Аномалия поляризуемости зависит от многих факторов. К ним относятся избыточная поляризуемость объекта, соотношение удельных сопротивлений объекта и вмещающей среды, форма, размеры, глубина и элементы залегания объекта. Рассмотрим аномалии от некоторых типов поляризующихся объектов для случая однородного первичного поля. Это условие, с хорошим приближением выполняется в средней части установки срединного градиента.

Аномалии η_k над поляризующимися пластами. Если вертикальный пласт выходит на поверхность земли и приемные электроды заземлены непосредственно в пласте, $\rho_{MN} = \rho_2$ (ρ_2 – удельное сопротивление пласта). Плотность тока $j_{MN} = j_0$ и $\rho_k = \rho_2$. Кажущаяся поляризуемость

$$\eta_k = 1 - \frac{\rho_k}{\rho_k^*} = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_2 / (1 - \eta_2)} = \eta_2. \quad (4.2)$$

Максимальная η_k , равная истинной поляризуемости пласта, наблюдается когда линия MN располагается внутри пласта.

Если пласт не выходит на поверхность земли, амплитуда аномалии уменьшается. В этом случае максимальное значение $\eta_{ка}$ пропорционально углу φ_0 , под которым видна верхняя грань пласта из точки над его центром (рис. 4.2):

$$\eta_{ка}^{\text{макс}} = \eta_{\text{изб}} \frac{\varphi_0}{180^\circ}. \quad (4.3)$$

Этой формулой можно пользоваться и для расчета аномалии в любой точке профиля. Тогда вместо максимального значения угла φ_0 надо подставлять угол φ для соответствующей точки:

$$\eta_{ка} = \eta_{\text{изб}} \frac{\varphi}{180^\circ}. \quad (4.3')$$

Угол φ можно определить по транспортиру на разрезе, построенном в достаточно крупном масштабе или рассчитать по очевидной формуле

$$\varphi = \text{arctg} \frac{x + b/2}{h} - \text{arctg} \frac{x - b/2}{h}, \quad (4.4)$$

обозначения в формуле ясны из рис. 4.2.

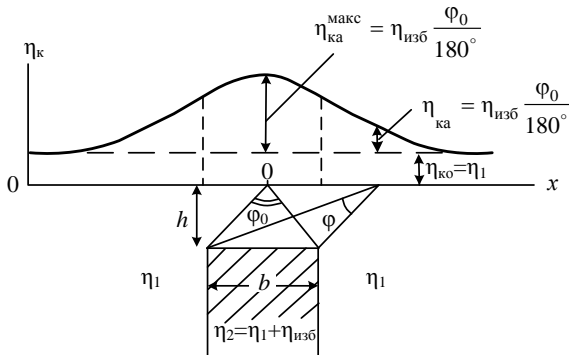


Рис. 4.2. К расчету аномалии η_k от вертикального пласта

Приведенные формулы справедливы для случая, когда пласт и вмещающая среда не различаются по удельному сопротивлению. Если их сопротивления различны, будут получены некоторые погрешности, тем большие, чем больше разница сопротивлений.

Положение контактов пласта определяется по точкам перегиба графика η_k . Практически это средние точки участков графика, на которых происходит наиболее быстрое изменение η_k (см. рис. 4.2).

Если пласт ограничен по глубине, для оценки вызываемой им аномалии можно воспользоваться теми же формулами. Пусть верхняя грань пласта располагается на глубине h_v , нижняя – на глубине h_n . В этом случае надо рассчитать аномалии от двух неограниченных по глубине пластов, залегающих на глубинах h_1 и h_2 , а затем из значений $\eta_{ка}$ для первого пласта вычесть значения $\eta_{ка}$ для второго пласта.

Для расчета аномалии от наклонного пласта он заменяется набором горизонтальных пластин толщиной Δh и шириной, равной мощности пласта. Каждая последующая пластина смещается относительно вышележащей в сторону падения пласта, так что вертикальные стороны пластин осредняются боковыми гранями пласта (рис. 4.3).

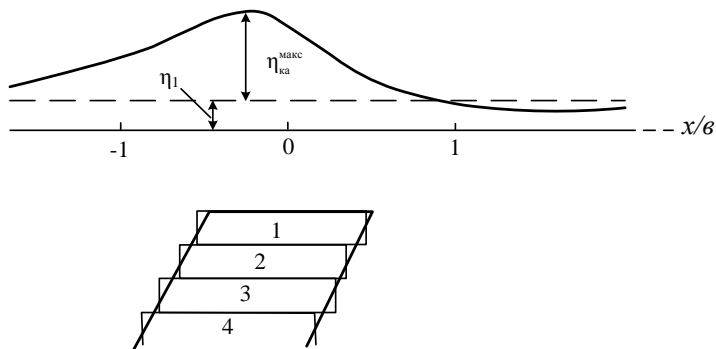


Рис. 4.3. Аномалия η_k над наклонным пластом и принцип ее расчета (угол падения 60°)

Над наклонным пластом максимум η_k смещается в сторону падения и аномалия становится асимметричной. Со стороны лежачего бока над контактом пласта значения η_k быстро убывают, а затем появляются отрицательные значения $\eta_{ка}$ (см. рис. 4.3). При этом уменьшается амплитуда аномалии по сравнению с вертикальным пластом с такими же параметрами. Уменьшение амплитуды аномалии тем больше, чем меньше мощность пласта b по отношению к его глубине h (рис. 4.4).

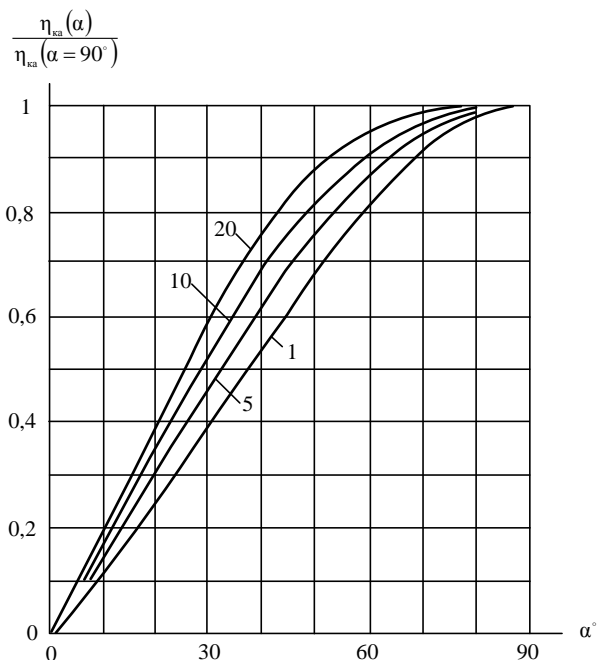


Рис. 4.4. Графики зависимости аномалии η_k от угла падения пласта (по С. С. Сыскову).
 Параметр кривых – b/h

Направление падения пласта определяется по асимметрии графика η_k . Для определения угла падения можно использовать отношение тангенсов углов наклона касательных к ветвям графика в точках перегиба. Для этой цели можно использовать номограмму, приведенную на рис. 4.5.

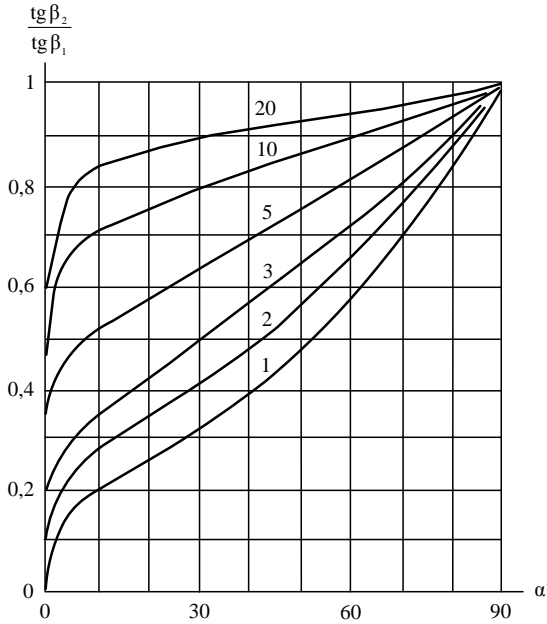


Рис. 4.5. Номограмма для определения угла падения поляризующегося пласта по отношению тангенсов углов наклона касательных к графику η_k (по С.С. Сыскову).
 Параметр кривых – b/h

Вопрос о влиянии проводящего приповерхностного слоя на аномалию η_k от вертикального пласта изучался М. В. Семеновым. Им рассчитаны значения коэффициента

$$\theta = \frac{\eta_{ка}^{макс}}{\eta_{изб}} \quad (4.5)$$

для различных значений ρ_2/ρ_1 и b/h_1 . При этом полагалось, что удельные сопротивления пласта и вмещающей его среды одинаковы (ρ_2). Результаты расчетов М. В. Семенова в форме номограммы приведены на рис. 4.6. Пользуясь номограммой можно для заданных условий определить θ . После этого при решении прямой задачи по формуле (4.4) можно определить амплитуду аномалии от пласта, перекрытого проводящим слоем, или при

интерпретации по амплитуде аномалии оценить избыточную поляризуемость пласта.

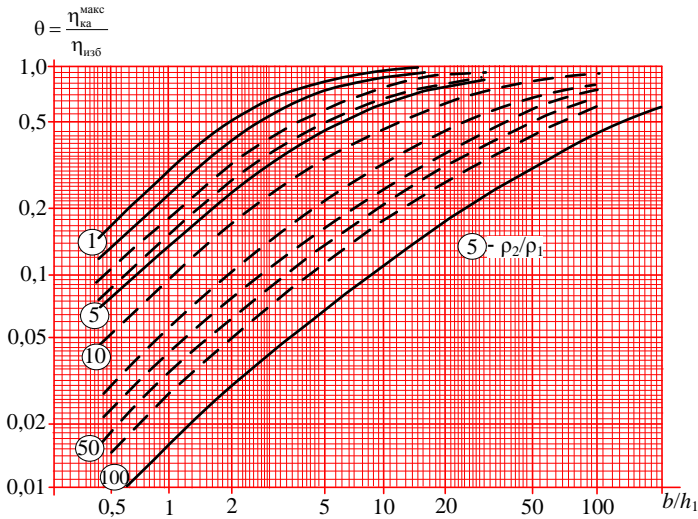


Рис. 4.6. Номограмма для учета влияния верхнего слоя на аномалию η_{κ}

По избыточной поляризуемости может быть примерно оценено содержание поляризующихся включений в пласте. Избыточная поляризуемость связана с содержанием включений ν соотношением [16]:

$$\eta_{\text{изб}} = \frac{\beta \nu}{1 + \beta \nu}, \quad (4.6)$$

где β – коэффициент, зависящий от структуры поляризующихся включений. По многочисленным определениям среднее значение β для колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений равно 2,6 [16]. Решив уравнение (4.6) относительно ν получим:

$$\nu = \frac{\eta_{\text{изб}}}{\beta(1 - \eta_{\text{изб}})}. \quad (4.7)$$

Пример аномалии η_{κ} над поляризующимся пластом приведен на рис. 4.7. На фоне 2 %, уверенно определяющемся по

восточной части профиля, максимальное значение $\eta_{ка}$ составляет 4 %. Наклон ветвей графика почти одинаков, но западная ветвь чуть положе, что позволяет сделать вывод о крутом западном падении пласта. Это согласуется и с формой графика Z_a , но противоречит геологическим представлениям, которые, судя по разрезу, основываются на единственной скважине. Отношение тангенсов углов касательных к левой и правой ветвям графика не меньше 0,95. По номограмме, приведенной на рис. 4.5, угол падения составляет около 80° .

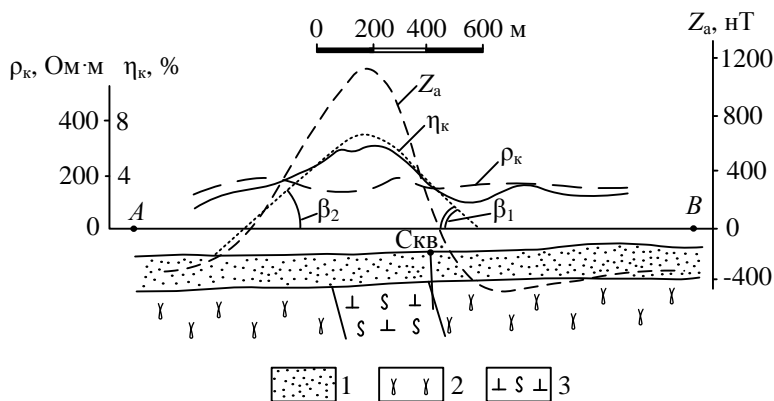


Рис. 4.7. Графики η_k и ρ_k срединного градиента и Z_a над рудоносной интрузией в Воронежской области (по Пишпаревой):
1 – осадочные породы платформенного чехла; 2 – гнейсы; 3 – рудоносные серпентинитизированные перидотиты

Поскольку нет данных о соотношении удельных сопротивлений осадочного платформенного чехла и фундамента, примем условно отношение $\rho_2/\rho_1=10$. Отношение $b/h=2,7$. При этих условиях коэффициент $\theta=0,22$. По формуле (4.5) исправленное максимальное значение $\eta_{изб}=18\%$. Содержание электропроводящих включений по формуле (4.7) 8,5 %.

При малой интенсивности аномалий от объектов поисков для более уверенного их выделения иногда на исследуемом участке определяют среднее значение η_k , а затем на каждой точке вычисляют разность $\eta_k - \eta_{ксп} = \eta_{ка}$. На графике аномальной ка-

жущейся поляризуемости слабые аномалии могут проявиться более отчетливо. Размер участка осреднения при этом следует выбирать таким, чтобы на нем не было заметного изменения нормального поля, вызванного изменением расстояния до питающих заземлений. Аналогичная методика может применяться и при анализе графиков ρ_k .

Аномалии η_k над локальными объектами. Универсальной формой для аппроксимации локальных объектов является эллипсоид. Его предельным случаем является шар. Пласт тоже можно рассматривать как предельную форму эллипсоида, когда две или одна ось имеют бесконечную длину.

Рассмотрим аномалию η_k при различной ориентировке первичного поля на примере того же эллипсоида, для которого в разделе 2.6 анализировалась аномалия ρ_k ($a:b:c=1:0,5:0,1$). Избыточную поляризуемость объекта примем равной 10 %. От ориентировки поля существенно зависит амплитуда аномалии и соотношение удельных сопротивлений объекта и среды при котором интенсивность аномалии достигает максимальной величины. Примем ориентировку первичного поля горизонтальной. Профиль ориентирован параллельно полю и располагается на расстоянии $0,25a$ от верхней кромки объекта. При этих условиях над разными объектами наблюдаются следующие аномалии:

Тип объекта	$\eta_{ка}^{макс} \%$	ρ_2/ρ_1
Шар	2,42	0,3
Горизонтальный эллипсоид с осью a , ориентированной по полю	2,26	0,03
Вертикальный эллипсоид с осью c , ориентированной по полю	0,97	1
Вертикальный эллипсоид с осью a , ориентированной по полю	0,60	0,05

Приведенные выше значения η_k рассчитаны без учета границы раздела "земля-воздух" так как при принятой малой глубине до объекта учет влияния поверхности земли путем удвоения был бы некорректным.

Таким образом, наибольшей интенсивности аномалии могут вызывать изометричные поляризующиеся объекты с удельным сопротивлением, в несколько раз меньшим сопротивления среды. Несколько меньшую амплитуду имеют аномалии от горизонтально залегающих линзовидных тел. Но для образования интенсивной аномалии η_k такие объекты должны иметь удельное сопротивление в несколько десятков раз меньше сопротивления среды. Крутопадающие маломощные линзовидные тела, ориентированные перпендикулярно полю, вызывают аномалии в два с половиной раза меньшей амплитуды по сравнению с предыдущими объектами. При этом они должны иметь примерно такое же сопротивление, как вмещающая среда. В наихудших условиях возбуждения аномалии находятся крутопадающие маломощные линзы, ориентированные по направлению поля. Графики зависимости амплитуды аномалий η_k от рассматриваемых типов объектов приведены на рис. 4.8.

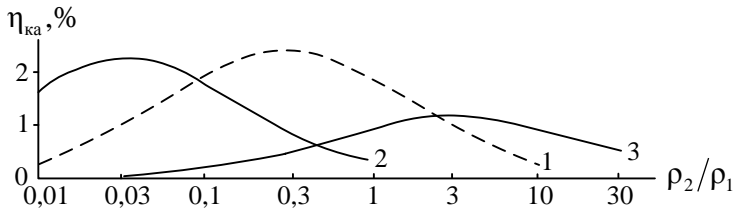


Рис. 4.8. Графики зависимости $\eta_{ка}$ от соотношения сопротивлений объекта и среды ($\eta_{изб}=10\%$):

1 – шар ($h=1,25a$); 2 – горизонтальный эллипсоид, ориентированный осью a по направлению поля ($a:c=1:0,5:0,1$, $h=0,35a$); 3 – эллипсоид с вертикальной осью b , ориентированный осью c по направлению поля ($h=0,75a$). $\eta_{ка}$ рассчитана без учета границы "земля – воздух". Глубина h указана до центра объекта

Если объект выходит на поверхность земли и приемная линия расположена внутри него, независимо от формы тела при $\rho_2/\rho_1 \rightarrow 0$ η_k стремится к истинной поляризуемости объекта. По мере увеличения ρ_2/ρ_1 амплитуда аномалии уменьшается (рис. 4.9). Скорость уменьшения в разных случаях различна. Медленнее всего интенсивность аномалии с ростом ρ_2 убывает для крутопадающей линзы, ориентированной перпендикулярно пер-

вичному полю. В этом случае амплитуда аномалии уменьшается вдвое, когда удельное сопротивление объекта примерно на полпорядка превышает сопротивление среды (кривая 1). Когда такая линза ориентирована по направлению поля, уменьшение амплитуды аномалии с ростом ρ_2 происходит быстро, и уже при $\rho_2 = \rho_1$ аномалия исчезает (кривая 2). Для изометричного объекта зависимость $\eta_{ка}$ от ρ_2/ρ_1 имеет промежуточный, между двумя рассмотренными выше случаями, характер.

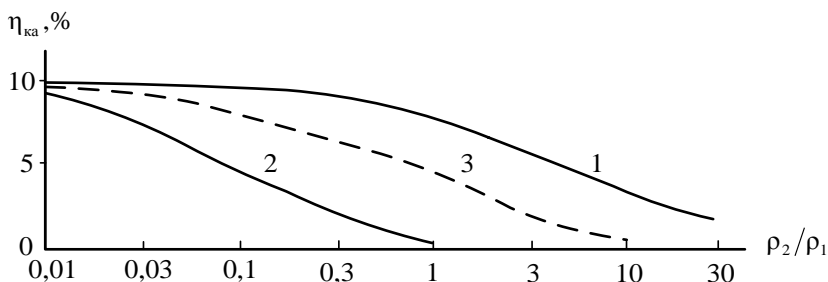


Рис. 4.9. Графики зависимости $\eta_{ка}$ от соотношения сопротивлений объекта и среды ($\eta_{изб} = 10\%$):

1 – вертикальный полуэллипсоид ($a:b:c=1:0,5:0,1$), ориентированный по профилю осью c ; 2 – то же, ориентированный по профилю осью a ; 3 – полушар

Ранее отмечалось, что при расположении приемной линии внутри бесконечного по падению и простиранию пласта, $\eta_{к}$ равно истинному значению поляризуемости независимо от соотношения сопротивлений. Такой пласт можно рассматривать как предельный случай полуэллипсоида с очень большими осями a и b , ориентированного перпендикулярно полю. Этим объясняется медленное уменьшение $\eta_{ка}$ с ростом ρ_2 для вертикальной линзы, ориентированной поперек поля. Это уменьшение будет еще более замедляться при увеличении размеров линзы по падению и простиранию.

Проводя интерполяцию между графиками, приведенными на рисунках 4.8 и 4.9, можно получить качественную картину зависимости аномалии $\eta_{к}$ от глубины залегания объекта.

Метод вызванной поляризации в модификации симметричного профилирования. Электрическое поле в симметричной установке по своему характеру не отличается от поля в средней части установки срединного градиента. Поэтому анализ аномалий для ВП-СГ справедлив и для СЭП-ВП. Необходимый для получения максимальной интенсивности аномалии размер установки можно оценить по той же формуле (4.1), что и для ВП-СГ.

Проведение работ по методу вызванной поляризации с симметричными установками больших размеров не технологично, так как в этом случае необходимо постоянно перемещать тяжелые питающие заземления и генератор большой мощности. Поэтому СЭП-ВП применяют в условиях малой мощности рыхлых отложений при небольшой глубине залегания искомым объектов. В этих случаях можно выполнять работы с небольшими разносами AB . Такая установка легкая и мобильная, так как можно использовать относительно маломощный генератор и устраивать питающие заземления с малым количеством электродов (нет необходимости в токе большой силы). Это особенно важно при работе в трудно проходимой местности (тайга, горы и т. п.).

4.3. Метод вызванной поляризации с установками комбинированного и дипольного профилирования

При поисках маломощных крутопадающих проводящих объектов установки, в которых первичное поле ориентировано горизонтально, часто оказываются малоэффективными. Такие тела лучше проявляются в установках, поле которых имеет достаточно большую вертикальную компоненту. В разделе 2 было показано преимущество при поисках подобных объектов установки комбинированного профилирования. Это преимущество связано с тем, что поле одного точечного заземления, используемое в составляющих установку КЭП трехэлектродных установках, имеет значительную вертикальную компоненту. Вертикальная компонента плотности тока медленнее затухает с

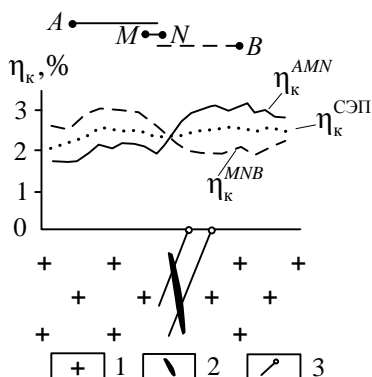
глубиной, чем горизонтальная. За счет нее происходит дополнительное возбуждение крутопадающих проводящих объектов и усиление аномалий.

Разность результатов измерений с двумя встречными трехэлектродными установками соответствует результату измерения с однополярной установкой. В средней части однополярной установки ориентировка первичного поля близка к вертикальной и крутопадающие проводящие тела оказываются в выгодных условиях возбуждения.

В случае полого залегания маломощного проводящего объекта наличие вертикальной компоненты поля не оказывает существенного влияния на амплитуду аномалии. Но такие тела возбуждаются горизонтальной компонентой первичного поля и также могут обнаруживаться при работе с трехэлектродными установками. В этом случае график η_k для каждой трехэлектродной установки анализируется отдельно, поэтому от второй установки можно отказаться и выполнять вместо КЭП трехэлектродное профилирование.

На рис. 4.10 приведены результаты работ над крутопадающей медно-молибденовой жилой. Над жилой наблюдается четкое обратное пересечение графиков η_k встречных трехэлектродных установок (графики η_k над поляризующимися объектами имеют такой же вид, как графики ρ_k над плохо проводящими телами, поэтому пересечение обратное). На графике η_k симметричной установки жила не проявляется.

Рис. 4.10. Графики η_k комбинированного и симметричного профилирования над медно-молибденовым рудным телом в Ю. Казахстане (по А. Т. Канееву и В. В. Слащину):
1 – граниты; 2 – рудное тело; 3 – скважины



Результаты наблюдений методом вызванной поляризации с трехэлектродной установкой над полого залегающей жилой приведены на рис. 4.11. Установка ориентировалась так, что питающий электрод располагался со стороны восстания жилы. Над жилой наблюдается четкая аномалия η_k , постепенно затухающая при перемещении установки в сторону падения жилы. При принятой ориентировке установки первичное поле направлено вдоль жилы, что создает благоприятные условия для возбуждения аномалии. При противоположной ориентировке установки аномалия была бы менее контрастной.

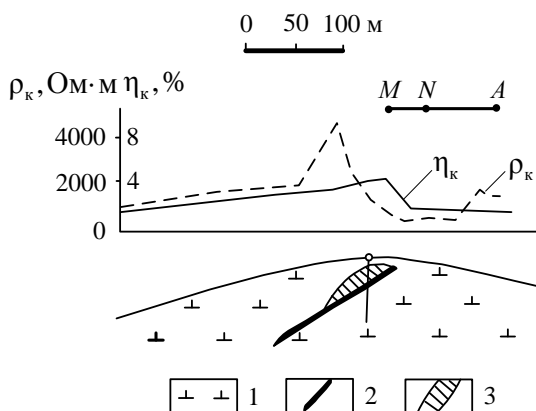


Рис. 4.11. Графики η_k и ρ_k профилирования с трехэлектродной установкой над золотоносной жилой (по Б. Б. Шатрову): 1 – вулканогенные породы; 2 – рудная жила; 3 – зона рудных прожилков

Трехэлектродные установки утяжеляются из-за удаленного заземления, которое необходимо уносить на расстояние на порядок большее размера установки. Более легкими и мобильными являются дипольные установки, с которыми получают результаты, подобные результатам трехэлектродного профилирования. Обычно применяют дипольные установки размером несколько десятков метров. Применение установок больших размеров сдерживается тем, что поле диполя затухает быстрее, чем поле точечного источника. Поэтому сила тока в питающей линии должна быть больше.

Пример результатов метода вызванной поляризации с дипольной установкой на оловорудном месторождении приведен на рис. 4.12. Оловорудные жилы сопровождаются сульфид-

ной вкрапленностью, что является предпосылкой для применения метода ВП. На рассматриваемом участке ДЭП-ВП отмечаются все известные рудные зоны, а рудные зоны на дне долины под слоем аллювия были открыты в результате этих работ.

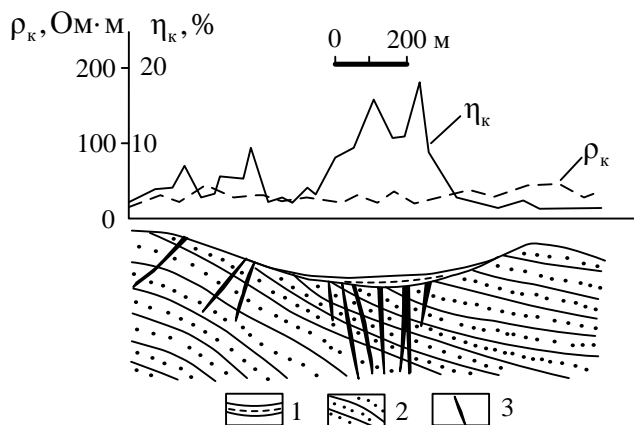


Рис. 4.12. Графики η_k и ρ_k дипольного профилирования ($AB=MN=50$ м, $L=75$ м) на оловорудном месторождении в Приморье (по В. Н. Земцову):

1 – аллювиальные отложения; 2 – алевролиты и песчаники; 3 – рудные тела

Если выполнять работы по схеме двухстороннего дипольного профилирования, будут получены результаты, аналогичные результатам КЭП-ВП. В этом случае положение отдельных жил малой мощности будет определяться точнее. Если размеры питающего и приемного диполей одинаковы, график встречной установки можно получить из наблюдаемого графика, пользуясь теоремой взаимности. Для этого надо построить тот же график, сместив его в сторону питающего диполя на размер установки.

4.4. Зондирование по методу вызванной поляризации

Для изучения изменения поляризуемости горных пород с глубиной и определения глубины до поляризующихся объектов

используется метод вызванной поляризации в модификации зондирования. ВЭЗ-ВП выполняется по такой же методике, как ВЭЗ по методу сопротивлений. Только при каждом разnose AB кроме $\Delta U_{\text{пр}}$ во время пропускания тока измеряется $\Delta U_{\text{ВП}}$. Соответственно вычисляются два параметра – ρ_k и η_k .

Если использовать обычно применяющуюся схему разносов питающих и приемных электродов, то при некоторых разносах, когда отношение MN/AB мало, значение $\Delta U_{\text{ВП}}$ может оказаться слишком малым и его будет трудно измерить. Для создания нормальных условий измерений в этом случае потребуются большая сила тока в питающей линии. Силу тока и мощность генераторной установки можно уменьшить, если работать с установкой Веннера. При этом теряется контроль за влиянием на кривую ρ_k изменения ρ_{MN} при смене разносов. На величину η_k изменение ρ_{MN} влияния не оказывает.

Интерпретация кривых ВЭЗ-ВП, если среду можно полагать пологослоистой, производится так же, как интерпретация обычных кривых ВЭЗ. Только процесс интерпретации усложняется ввиду необходимости выполнять интерпретацию одновременно по двум параметрам – η_k и ρ_k , так как вид кривых η_k зависит не только от поляризуемости слоев, но и от их удельного сопротивления. Форма кривых η_k зондирования над разрезом, содержащим слои с различной поляризуемостью, подобна кривым ρ_k над разрезом со слоями разного сопротивления. Слои с повышенной поляризуемостью отмечаются максимумами η_k , слои с низкой поляризуемостью – минимумами. При интерпретации надо иметь в виду, что возможны случаи несоответствия границ по сопротивлению и поляризуемости.

В случае двухслойной среды с поляризующимся нижним слоем глубину до него можно приближенно оценить по точке перегиба кривой η_k . Разнос $AB/2$, на котором располагается точка перегиба, примерно соответствует глубине до поляризующегося слоя. Этот способ дает удовлетворительные результаты, когда сопротивления слоев мало различаются. Над дифференцированными по ρ разрезами погрешность получается больше.

ВЭЗ-ВП часто применяется для решения гидрогеологических задач, так как глины и насыщенные пресной водой пески обычно заметно различаются по поляризуемости, а по сопротивлению могут не отличаться. На рис. 4.13 приведены кривые ВЭЗ-ВП над разрезом с водоносным горизонтом. Слой песка с пресной водой отмечается четким максимумом η_k . На кривой ρ_k этот слой не проявляется. Так как вышележащая толща по сопротивлению слабо дифференцирована, положение кровли водоносного горизонта хорошо определяется по точке перегиба кривой η_k .

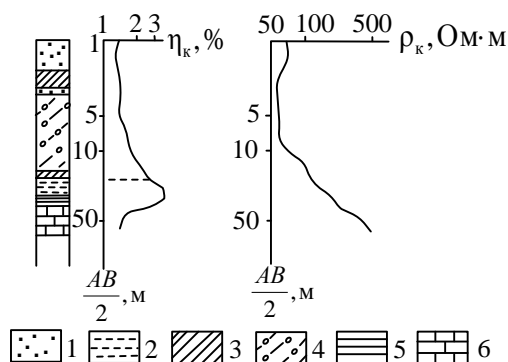


Рис. 4.13. Результаты ВЭЗ-ВП над разрезом с водоносным горизонтом (по Э. Н. Кузьминой):

1 – сухой песок; 2 – песок с пресной водой; 3 – суглинок; 4 – суглинок с гравием; 5 – глина; 6 – известняк

При поисках рудных объектов важное значение имеет изучение изменения интенсивности минерализации с глубиной. Эта задача может решаться с помощью ВЭЗ-ВП. Если при увеличении размеров установки наблюдается увеличение η_k , можно делать вывод о повышении поляризуемости, а следовательно и интенсивности минерализации с глубиной. Такие аномалии представляют наибольший интерес. Если после какого-то разноса AB η_k начинает уменьшаться и нет оснований предполагать боковое или иное влияние неоднородности среды по горизонтали, такая аномалия вряд ли заслуживает внимания. Когда до-

стигнув каких-то аномальных значений, при дальнейшем увеличении AB η_k остается постоянной, при проверке аномалии можно ограничиться глубиной, соответствующей глубине исследования при данном разnose AB . Увеличение интенсивности минерализации на бóльших глубинах мало вероятно.

На рис. 4.14 приведены кривые ВЭЗ-ВП на медноникелевом месторождении в Норильском районе. В точке, расположенной над рудным телом, в начальной части кривой η_k не превышает 1 %. После разносов $AB/2$ 100-120 м кажущаяся поляризуемость начинает быстро возрастать и на последнем разносе увеличивается до 8 % (см. рис. 4.14, а). Точка перегиба кривой η_k наблюдается при $AB/2$, примерно равном глубине до рудного тела. В безрудной точке при всех разносах AB η_k не превышает 1 % (см. рис. 4.14, б).

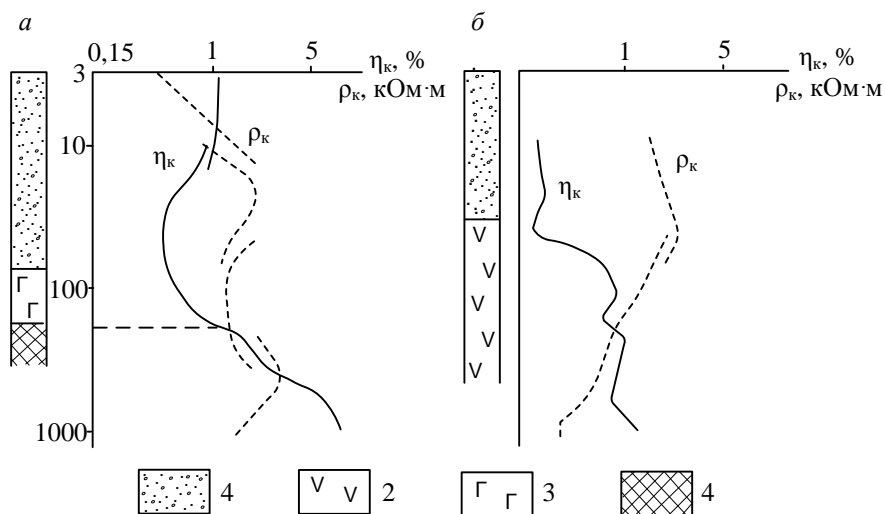


Рис. 4.14. Результаты ВЭЗ ВП на медно-никелевом месторождении в Норильском районе (по А. М. Вольхину):

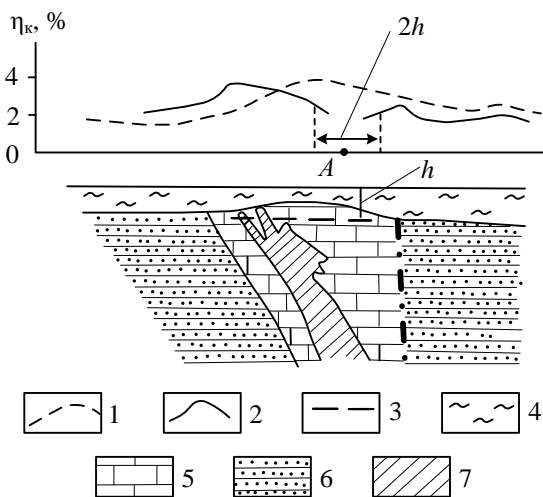
1 – рыхлые отложения; 2 – базальты; 3 – габбродиабазы; 4 – сульфидные руды

Для определения глубины до поляризующегося объекта можно вместо ВЭЗ-ВП выполнить профилирование в поле неподвижного питающего заземления, расположенного в центре

аномалии. В этом случае, пока приемная линия не выходит за пределы проекции поляризующегося объекта, график η_k можно рассматривать как кривую зондирования и полагать расстояние от питающего заземления до точки перегиба графика равным глубине до объекта. Так как левая и правая ветви графика η_k обычно не симметричны, следует определять расстояние между точками перегиба левой и правой ветвей, равное $2h$. Пример такого способа оценки глубины до объекта приведен на рис. 4.15.

Рис. 4.15. Пример определения глубины до объекта по результатам измерений в поле неподвижного заземления (по материалам Джизакской геофизической экспедиции, Узбекистан):

1 – график η_k в средней части установки СГ; 2 – график η_k в поле заземления А; 3 – положение верхней кромки объекта по данным метода ВП; 4 – рыхлые отложения; 5 – доломитизированные известняки; 6 – переслаивание алевролитов, песчаников и известняков; 7 – полиметаллические руды



При поисках локальных объектов наглядную характеристику геополаризационного разреза дают вертикальные карты (разрезы) η_k . Они строятся и интерпретируются так же, как разрезы ρ_k .

Для зондирования по методу вызванной поляризации можно использовать и другие типы установок, например, установку комбинированного профилирования или одиночную трехэлектродную установку. Установка КЭП эффективна при поисках маломощных крутопадающих объектов, обладающих повышенной электропроводностью и поляризуемостью. В этом случае можно так же, как в методе сопротивлений вычислять разность $\Delta\eta_k = \eta_k^{AMN} - \eta_k^{MNB}$ и строить вертикальную карту $\Delta\eta_k$,

которая отражает положение поляризующегося объекта в разрезе. Глубину, на которой находится его верхняя часть, можно примерно оценить, поделив на 1,5 разнос AO , при котором $\Delta\eta_k$ достигает максимальной величины.

Можно также использовать одностороннюю или двухстороннюю дипольную установку. Результаты зондирования с этими установками аналогичны результатам зондирования с установками AMN и $KЭП$ соответственно.

4.5. Метод центрального электрода

Метод центрального электрода, позволяющий получить качественное представление о разрезе, может применяться вместо ВЭЗ-ВП. Его принцип был предложен сотрудниками Рудгеофизики (В. А. Комаров, М. В. Семенов). В практическом плане он разрабатывался затем в основном в СНИИГГиМСе (В. С. Моисеев и др.).

В этом методе выполняются измерения в поле неподвижного электрода (второй питающий электрод относится на большое расстояние) по участку профиля длиной 500-700 м в обе стороны от питающего электрода. Затем питающий электрод перемещается на следующую точку (на 100-200 м) и снова выполняются измерения на таком же участке профиля. Таким образом производят измерения по всему профилю.

По мере увеличения расстояния между точкой наблюдений и питающим заземлением глубина исследования возрастает, при этом возникает эффект зондирования. На каждой точке профиля измерения выполняются в поле нескольких питающих заземлений, расположенных на различных расстояниях от точки наблюдений. Совокупность измерений на точке аналогична результатам зондирования.

Результаты измерений представляются в виде разрезов η_k . При их построении результаты измерений относятся к точкам, расположенным на линиях, проведенных из пунктов стояния питающих заземлений под углом 30° , под центрами приемной линии. Точкам пересечения лучей от двух питающих

заземлений приписываются средние значения η_k . По полученному полю значений кажущейся поляризуемости строятся изолинии η_k . Вертикальные карты η_k интерпретируются так же, как разрезы ρ_k . По ним устанавливаются области повышенной поляризуемости, соответствующие поляризующимся объектам и определяется примерная глубина до них.

На рис. 4.16 приведен пример вертикальной карты η_k на полиметаллическом месторождении. Рудное тело выделяется замкнутыми изолиниями η_k с повышенными отметками. Верхняя граница аномальной области располагается несколько выше рудной залежи.

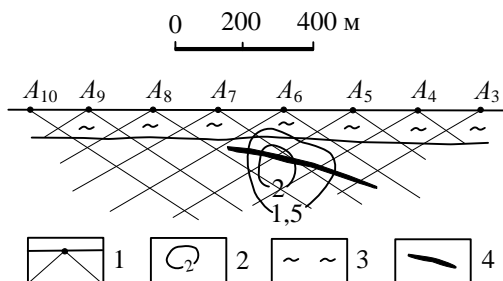


Рис. 4. 16. Вертикальная карта η_k по методу центрального электрода на Рубцовском полиметаллическом месторождении на Алтае (по В. С. Моисееву и др.):

1 – положения питающих заземлений и линии, к которым относятся результаты измерений; 2 – изолинии η_k ; 3 – рыхлые отложения; 4 – рудная зона

При построении вертикальной карты должны исключаться результаты измерений при расположении питающего электрода в пределах аномалии, так как в этом случае значения η_k получаются завышенными и аномалия растягивается на весь участок профиля, обработанный с этим электродом. Так при построении разреза, приведенного на рис. 4.16, не использовались результаты измерений в поле заземления A_6 .

По сравнению с ВЭЗ-ВП метод центрального электрода более производительен, так как измерения на точке выполняются

при одном положении питающего заземления. Переносится только приемная линия, как в методе срединного градиента.

4.6. Скважинные модификации метода вызванной поляризации

В методе вызванной поляризации использование скважин, как и в других методах электроразведки, позволяет увеличить глубину исследований и повысить их детальность. В зависимости от расположения питающих заземлений и приемной линии можно выделить три варианта скважинных измерений:

- скважина–поверхность;
- поверхность–скважина;
- скважина–скважина.

В названиях модификаций сначала указано расположение источника поля, затем – приемной линии. Обычно измеряют градиент потенциала, который при необходимости можно пересчитать в потенциал относительно выбранного условного уровня. Это делается для уменьшения помех.

Вариант скважина–поверхность это заряд-ВП. Такие измерения выполняются так же, как в обычном методе заряда, только кроме $U_{пр}$ или $\Delta U_{пр}$ в поле тока измеряются эти величины после импульса тока – $U_{ВП}$ или $\Delta U_{ВП}$.

В варианте поверхность–скважина приемная линия перемещается по скважине, а основное питающее заземление располагается на поверхности земли вблизи скважины. Второй питающий электрод относится на "бесконечность". Работы могут выполняться в форме вертикального профилирования, когда питающий электрод заземляется около устья скважины (обычно на обсадную трубу), или в виде азимутальных измерений. Во втором случае питающее заземление относят на некоторое расстояние от скважины по нескольким направлениям (обычно по четырем) и каждый раз выполняют измерения по скважине. В 60-х годах прошлого века такая методика в варианте метода со-

противлений применялась на Урале под названием метода вертикального градиента.

Исследования по схеме скважина-скважина могут выполняться несколькими способами. Это могут быть такие же измерения, как в предыдущем случае, но при расположении питающего заземления на забое той же скважины (односкважинный вариант) или в соседней скважине (двухскважинный вариант). Параметрические измерения выполняются путем профилирования по скважине с установкой размером 5-10 м.

Метод заряда-ВП, как и обычный метод заряда, применяется для поисков рудных тел в окрестностях зарядной скважины и для прослеживания встреченного скважиной оруденения. Методика работ не отличается от методики обычного заряда. Измерения могут выполняться способом потенциала или способом градиента потенциала.

При интерпретации результатов МЗ-ВП надо учитывать особенности поведения первичного поля и поля ВП. Механическая аналогия с приемами обработки и интерпретации полевой электроразведки методом вызванной поляризации может привести к неверным выводам. При измерении градиента потенциала первичное поле и поле ВП в пределах профиля меняют знак. При этом точки перехода через нуль $\Delta U_{\text{пр}}$ и $\Delta U_{\text{ВП}}$ не совпадают. Поэтому вблизи точки перехода $\Delta U_{\text{пр}}$ через нуль значения η_k многократно возрастают и имеют бесконечный разрыв. На участке, где $\Delta U_{\text{ВП}}$ и $\Delta U_{\text{пр}}$ имеют разные знаки, значения η_k становятся отрицательными.

Пример подобной картины приведен на рис. 4.17, а. Между пикетами 16 и 20, т. е. на интервале профиля длиной 100 м, график η_k не содержит никакой информации о разрезе. Очевидно, на интервалах профилей с переходами графиков $\Delta U_{\text{пр}}$ и $\Delta U_{\text{ВП}}$ через нуль вычисление η_k не имеет смысла.

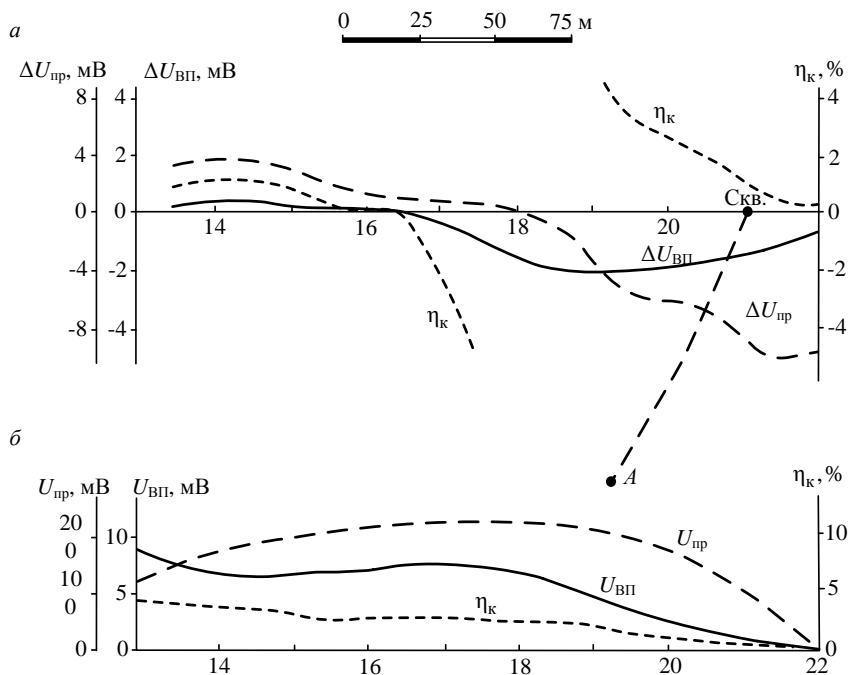


Рис. 4.17. Результаты измерений МЗ-ВП способом градиента (а) и потенциала (б)

На участках профилей, удаленных от точек перехода графиков градиента потенциала через нуль, можно вычислять $\eta_{\text{к}}$ и интерпретировать результаты обычным способом. В приведенном на рис. 4.18 примере градиент потенциала первичного поля переходит через нуль восточнее скважины. Здесь наблюдается резкий выскоч $\eta_{\text{к}}$. Над расположенным к западу от скважины рудным телом наблюдается отчетливая аномалия $\eta_{\text{к}}$, имеющая значительно большую интенсивность по сравнению с аномалией в установке срединного градиента.

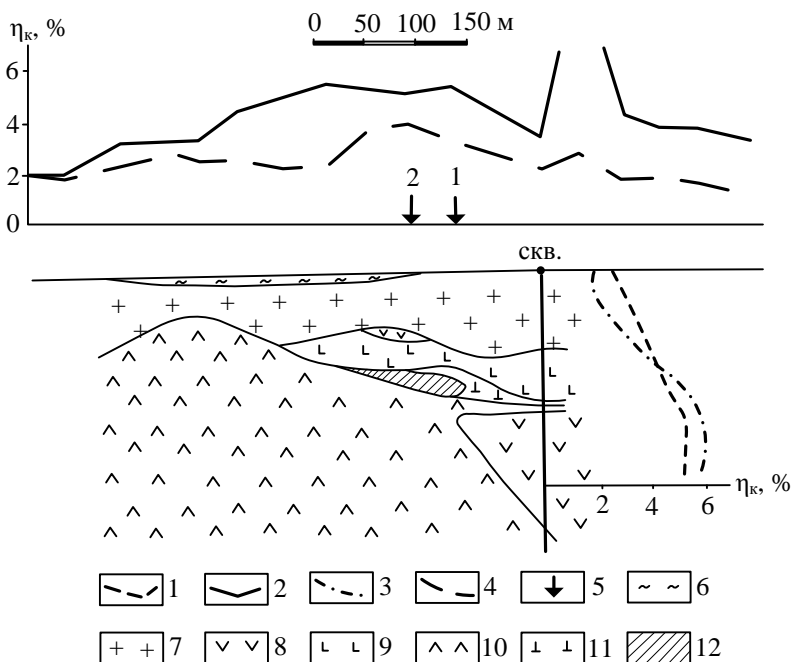


Рис. 4.18. Результаты скважинных исследований по методу вызванной поляризации на колчеданном месторождении:

1 – график η_k для установки срединного градиента; 2 – график η_k в поле заземления в скважину ($H=120$ м); 3 – график зависимости η_k от глубины питающего заземления в скважине (MN в точке 1); 4 – то же при MN в точке 2; 5 – положение приемной линии при измерениях в поле заземления, перемещающегося по скважине; 6 – рыхлые отложения; 7 – кварцевые плагиопорфиры; 8 – кварцевые порфиристы; 9 – диабазовые порфиристы; 10 – миндалекаменные диабазовые порфиристы; 11 – альбитофиры; 12 – колчеданные руды

Более просто выглядит картина распределения потенциала вызванной поляризации. На рис. 4.17, б по графику потенциала ВП, полученному путем пересчета из графика $\Delta U_{ВП}$, отчетливо видно повышение поляризуемости среды по направлению с востока на запад. Аналогично ведет себя и η_k , вычисленная через потенциалы. По графикам, приведенным на рис. 4.17, а вывод о повышении поляризуемости среды с востока на запад сделать трудно. Следует заметить, что поведение η_k зависит от положения точки, потенциалы которой принимаются за нулевые.

План изолиний потенциала по МЗ-ВП над колчеданным рудным телом приведен на рис. 4.19, *a*. Заряд располагался на глубине 270 м по вертикали в нижней выклинке рудного тела, представленной рудной вкрапленностью. Изолиниями $U_{\text{ВП}}$ с максимальными отметками оконтуривается область над северной частью рудной залежи, ближе всего подходящей к поверхности земли. Погружающаяся к югу часть рудной зоны отмечается сначала резкой выпуклостью изолинии с отметкой 0,08, а затем она вместе с полосой минерализованных рудовмещающих кварцевосерицитовых сланцев проявляется широкой областью повышенных значений $U_{\text{ВП}}$.

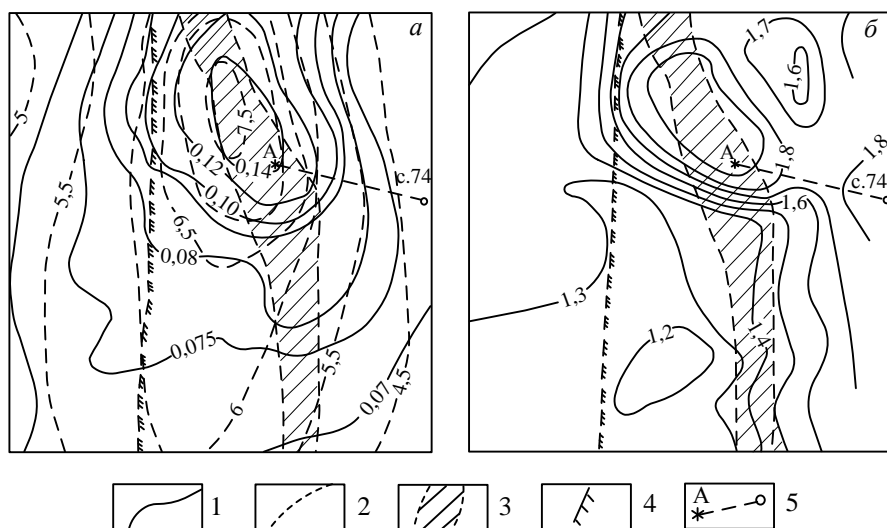


Рис. 4.19. Результаты МЗ-ВП на Чусовском колчеданном месторождении (по материалам В. Е. Петряева):

a – план изолиний $U_{\text{пр}}$ и $U_{\text{ВП}}$; *б* – план изолиний $\eta_{\text{к}}$.

1 – изолинии $U_{\text{ВП}}$ (*a*) и $\eta_{\text{к}}$ (*б*); 2 – изолинии $U_{\text{пр}}$; 3 – проекция рудной залежи на поверхность земли; 4 – западный контакт кварцево-серицитовых сланцев; 5 – проекция скважины и заряда ($H=270$ м)

Изолиниями потенциала первичного поля отмечается неглубоко залегающая северная часть рудного тела, а южнее – выход к поверхности земли полосы кварцевосерицитовых сланцев.

Южная часть рудной залежи изолиниями $U_{\text{пр}}$ не отмечается. Причина различия проявления погруженной части залежи на планах изолиний $U_{\text{ВП}}$ и $U_{\text{пр}}$ в том, что в породах висячего бока развита достаточно интенсивная вкрапленная минерализация, обусловившая аномалию $U_{\text{ВП}}$. Аномалии $U_{\text{пр}}$ здесь не наблюдаются, так как эти породы имеют высокое удельное сопротивление. Аномалией $U_{\text{пр}}$ отмечается геоэлектрический ореол повышенной электропроводности, развитый в рудовмещающих сланцах.

План изолиний $\eta_{\text{к}}$, рассчитанный по $U_{\text{ВП}}$ и $U_{\text{пр}}$, приведен на рис. 4.19, б. На нем хорошо отмечается северная неглубоко залегающая часть рудного тела, но непонятно появление минимума $\eta_{\text{к}}$ восточнее положительной аномалии. Южная часть плана изолиний $\eta_{\text{к}}$ не информативна.

Таким образом, наиболее целесообразным способом обработки и интерпретации результатов МЗ-ВП представляется построение графиков и планов $U_{\text{ВП}}$ и $U_{\text{пр}}$ и их последующая совместная интерпретация.

Другим вариантом измерений по схеме скважина-поверхность является зондирование с погруженным электродом. Оно выполняется так же, как в методе сопротивлений (см. раздел 2.15). С помощью такой методики обнаруживаются поляризующиеся объекты в окрестностях скважины и определяется глубина их залегания. Пример результатов таких исследований приведен на рис. 4.18.

Работы по схеме поверхность-скважина проводятся с целью поисков и изучения поляризующихся объектов вблизи скважины. При проведении таких работ обязательно выполнение параметрических измерений. Результаты параметрических измерений необходимы при интерпретации для учета влияния поляризуемости пород, слагающих стенки скважины.

Пример односкважинных наблюдений с питающим заземлением на обсадной трубе приведен на рис. 4.20. На уровне расположенного на расстоянии нескольких метров от скважины рудного тела наблюдается отчетливая аномалия $\eta_{\text{к}}$. Повышенной поляризуемостью стенок скважины аномалия объяснена

быть не может, так как по данным параметрических измерений в пределах аномального участка, за исключением самой верхней его части, поляризуемость стенок низкая.

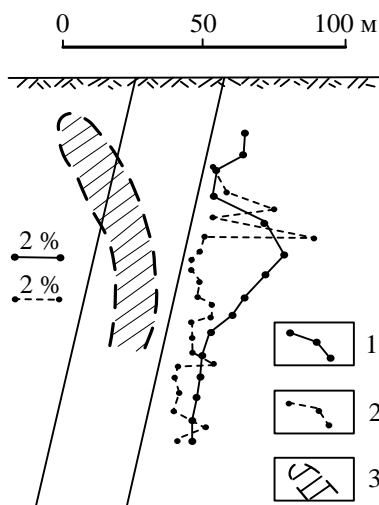


Рис. 4.20. Графики η_k (по В. А. Шафаренко):

1 – в поле заземления на обсадной трубе; 2 – с параметрической установкой А5М1N; 3 – схематический контур оборудования

Такие же измерения могут проводиться при расположении питающего электрода на забое скважины. Это уже наблюдения по схеме скважина-скважина (как и параметрические измерения).

По результатам измерений в поле заземления на устье или забое скважины можно установить наличие объекта и его положение по глубине. Направление на объект в этом случае не определяется. Чтобы определить с какой стороны от скважины располагается объект, необходимо выполнить измерения при нескольких положениях питающего заземления. Обычно питающий электрод относят от устья скважины по четырем лучам. Расстояние до него, в зави-

симости от глубины скважины, может быть от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Аномалия имеет наибольшую интенсивность, когда питающий электрод отнесен в сторону объекта.

При наличии нескольких скважин для поисков рудных тел в межскважинном пространстве может быть использован двухскважинный вариант схемы скважина-скважина. В этом случае в одной скважине помещается питающий электрод, в другой – приемная линия. Измерения могут производиться в по-

ле неподвижного питающего электрода или при синхронном перемещении питающего электрода и приемной линии.

4.7. Поведение тока в питающей линии и ΔU на приемных электродах в процессе зарядки. Токовый вариант метода ВП

Сила тока в питающей линии, в соответствии с законом Ома, зависит от напряжения источника тока U и сопротивления цепи R_{AB} . Кроме того, на величину тока оказывает влияние меняющаяся во времени э. д. с. вызванной поляризации среды $\mathcal{E}_{ВП}$. $\mathcal{E}_{ВП}$ направлена противоположно току и приводит к его уменьшению. При постоянном напряжении генератора

$$I_{AB}(t) = (U/R_{AB}) - \mathcal{E}_{ВП}(t)/R_{AB}. \quad (4.8)$$

Таким образом, если U и R_{AB} постоянны, в процессе зарядки происходит уменьшение силы тока.

В процессе зарядки на приемных электродах изменяется разность потенциалов вызванной поляризации $\Delta U_{ВП}$ и омическое падение напряжения $\Delta U^{(0)}$ на участке между приемными электродами

$$\Delta U^{(0)} = E_{MN} l = j_{MN} \rho_{MN} l,$$

где l – размер линии MN . В любой момент времени t в процессе зарядки разность потенциалов на приемных электродах

$$\Delta U(t) = j_{MN}(t) \rho_{MN} l + \Delta U_{ВП}(t). \quad (4.9)$$

Плотность тока j_{MN} изменяется по тому же закону, что и ток I_{AB} . Компоненты разности потенциалов в процессе зарядки изменяются в противоположных направлениях: $\Delta U_{ВП}$ растет, а $\Delta U^{(0)}$ убывает. В зависимости от соотношения амплитуд изменения $\Delta U_{ВП}$ и $\Delta U^{(0)}$ суммарная разность потенциалов на приемных электродах может в процессе зарядки изменяться по-разному. Если на участке приемной линии находится поляризующийся объект, преобладает рост $\Delta U_{ВП}$ по сравнению с изменением $\Delta U^{(0)}$ и измеряемая ΔU увеличивается (рис. 4.21, б). Если такого объекта на участке MN нет, вызванное поляризацией среды уменьшение питающего тока оказывает преобладающее влияние и ΔU уменьшается (см. рис. 4.21, в). В процессе спада поведение

$\Delta U = \Delta U_{\text{ВП}}$ в обоих случаях одинаково. Особенности изменения ΔU в процессе зарядки могут быть использованы для классификации аномалий.

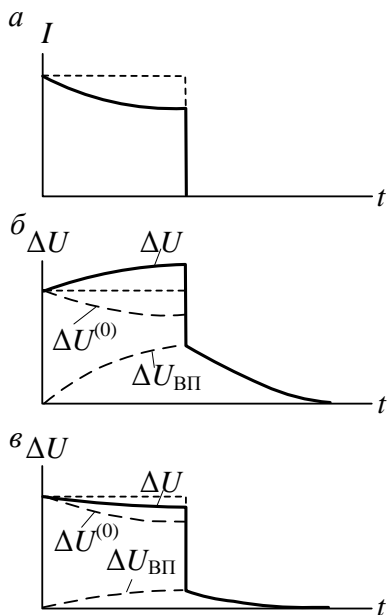


Рис. 4.21. Поведение тока в линии AB (а) и ΔU на электродах MN в процессе зарядки (б, в)

Для этого на участке работ надо выполнить серию измерений η_k и η_{ki} и построить график зависимости между ними. Измерения можно выполнять на образцах или в скважине. Так как для разных участков такие зависимости могут несколько различаться, их надо определять для каждого участка работ.

Для измерений можно использовать любой миллиамперметр постоянного тока и специальную приставку, принцип которой показан на рис. 4.22. В положении переключателя $I_{\text{пр}}$ измеряется сила тока в линии AB при включенном источнике питания. В положении $i_{\text{ВП}}$ измеряется ток вызванной поляризации

Токовый вариант метода вызванной поляризации.

Если после выключения тока оставить питающую линию замкнутой, под действием э. д. с. поляризации среды в ней потечет ток $i_{\text{ВП}}$. Отношение $i_{\text{ВП}}/I$ является мерой поляризуемости среды между питающими электродами. Это позволяет построить методику токового варианта ВП. Отношение тока ВП и тока пропускания можно рассматривать как кажущуюся поляризуемость:

$$\eta_{ki} = \frac{i_{\text{ВП}}}{I}. \quad (4.10)$$

Значения η_{ki} меньше, чем кажущаяся поляризуемость, измеренная по обычной методике, но можно найти статистическую связь между этими параметрами.

при выключенном источнике. Если используется прибор, измеряющий напряжение, например АЭ-72, надо включить в цепь эталонное сопротивление и измерять на нем падение напряжения, пропорциональное силе тока. При измерениях в скважинах можно использовать каротажную станцию. Применяя импульсный режим возбуждения в этом случае, можно производить непрерывную запись.

Основной вклад в $i_{ВП}$ вносит поляризация участков среды, примыкающих к питающим электродам, так как плотность тока обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника поля, а э. д. с. ВП прямо пропорциональна плотности тока. Поэтому глубина исследования в токовом варианте метода ВП незначительна. Но такие исследования могут с успехом применяться в каротаже ВП. При этом не возникает затруднений при измерениях в интервалах очень низкого сопротивления, например, сложенных массивными рудами, где измерения по стандартной методике трудны или даже невозможны. Кроме того, при токовом варианте ВП практически отсутствуют помехи.

На рис. 4.23 приведен пример результатов токового каротажа ВП на Западно-Озерном месторождении в Башкирии и данные стандартного каротажа ВП по этой же скважине. В верхней части показанного на рисунке интервала залегают андезитовые порфириты, характеризующиеся по данным каротажа КС сопротивлением порядка 5000 Ом·м. Ниже уровня 230 м породы интенсивно изменены вплоть до хлоритосерицитовых метасоматитов. На этом интервале ρ_k составляет несколько сотен Ом·м. В нижней части интервала наблюдается сульфидная

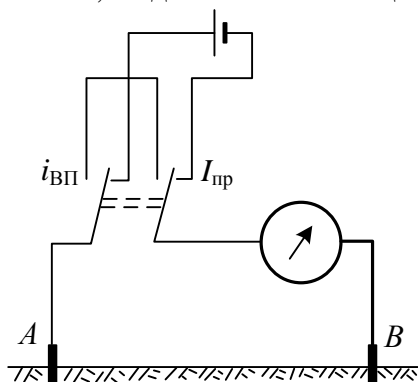


Рис. 4.22. Принцип измерений в токовом варианте метода ВП

вкрапленность. Массивные колчеданные руды характеризуются практически нулевыми сопротивлениями.

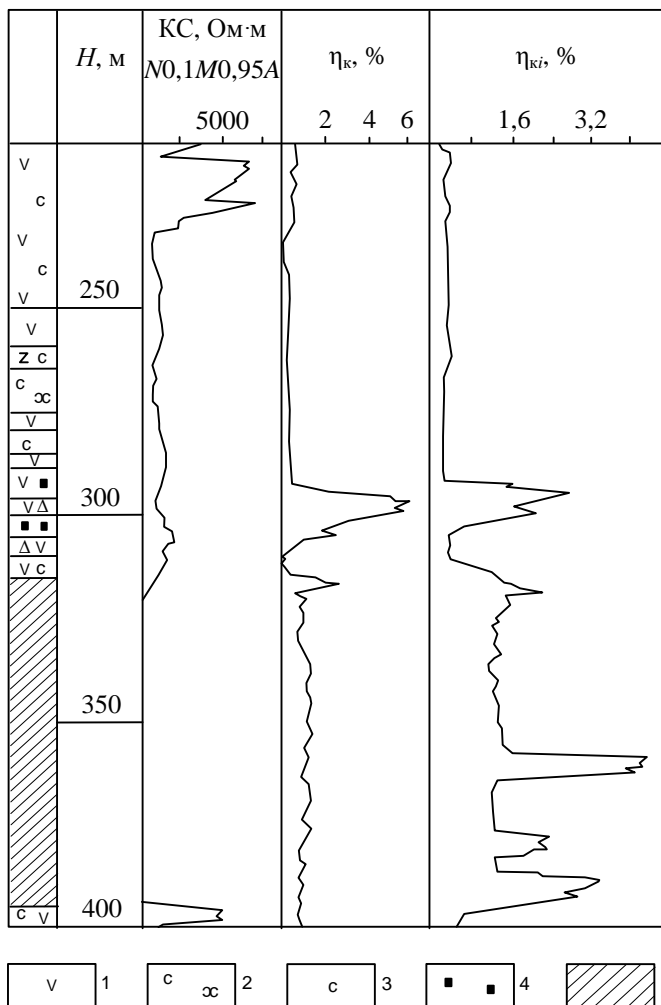


Рис. 4.23. Графики ρ_k , η_k и η_{ki} по скважине на Западно-Озерном месторождении (по М. С. Шумакову):

1 – андезитовые порфириты; 2 – хлоритсерицитовые породы; 3 – серицитизация; 4 – вкрапленность сульфидов; 5 – сульфидные руды

Андезитовые порфириты и большая часть интервала гидротермально измененных пород характеризуются низкими значениями кажущейся поляризуемости. Зоны сульфидной вкрапленности в рудовмещающих породах вблизи кровли массивных руд одинаково отчетливо выделяются на диаграммах η_k как в стандартном, так и в токовом каротаже ВП. На всем интервале массивных руд наблюдаются аномальные значения η_{ki} . Стандартный каротаж ВП дает здесь фоновые значения. Повидимому это связано с крайне малыми значениями $\Delta U_{ВП}$ при близком к нулю ρ_{MN} .

4.8. Временные характеристики вызванной поляризации. Дифференциальная кажущаяся поляризуемость

Закон изменения $\Delta U_{ВП}$ в процессе разрядки. Использование скорости спада для классификации аномалий. Разными исследователями предлагались различные уравнения для описания поведения $\Delta U_{ВП}$ и η_k в процессе спада. Наиболее простой закон спада предложил еще в начале тридцатых годов прошлого века К. Шлюмберже, начавший в то время применять разработанную им методику каротажа ВП. Он полагал, что процессы зарядки и спада ВП происходят аналогично заряду и разряду конденсатора, т. е. по экспоненциальному закону:

в процессе зарядки

$$\Delta U_{ВП}(t) = \Delta U_{ВП}(t = \infty) \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (4.11)$$

в процессе спада

$$\Delta U_{ВП}(t) = \Delta U_{ВП}(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.12)$$

Анализ практических кривых спада показывает, что аппроксимировать их одной экспонентой обычно не удастся. Они могут быть представлены в виде суммы нескольких экспонент. На небольшом интервале времени бывает достаточно двух или трех экспонент. Это разложение на экспоненты проявляется на кривой спада, построенной в полулогарифмическом масштабе. В

таким масштабе каждой экспоненте соответствует прямолинейный отрезок графика. В приведенном на рис. 4.24 примере экспериментальная кривая спада, полученная при измерениях в песке с крошкой графита, в диапазоне от 0,5 с до 60 с отчетливо распадается на две экспоненты. Из полулогарифмического графика выпадает лишь точка при $t=20$ с, в которой амплитуды экспонент близки и равное их сумме результирующее значение заметно отличается от обеих экспонент. Такое положение наблюдается во временном диапазоне между 10 и 30 секундами. Можно предполагать, что каждая экспонента отражает различные процессы вызванной поляризации или поляризацию разных элементов среды.

По построенной в полулогарифмическом масштабе кривой спада можно определить постоянную времени τ для каждой экспоненты. Прологарифмировав уравнение (4.12), получим:

$$\ln \Delta U_{\text{ВП}}(t) = \ln \Delta U_{\text{ВП}}(0) - t/\tau,$$

откуда

$$\tau = \frac{t}{\ln \Delta U_{\text{ВП}}(0) - \ln \Delta U_{\text{ВП}}(t)}. \quad (4.13)$$

Вместо разности между начальным значением $\Delta U_{\text{ВП}}$, определяемым по точке пересечения соответствующего отрезка с осью ординат, и значением в момент времени t можно взять разность между значениями $\Delta U_{\text{ВП}}$ для любого интервала Δt . Ес-

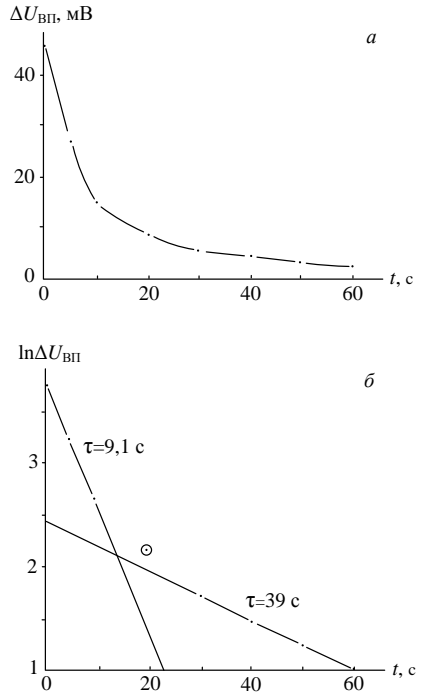


Рис. 4.24. Экспериментальная кривая в обычном (а) и полулогарифмическом (б) масштабе

ли кривая спада построена для десятичных логарифмов $\Delta U_{\text{ВП}}$, вычисление τ производится по той же формуле, только числитель надо умножить на 0,43.

Постоянная времени τ характеризует скорость процесса разряда среды и может быть использована для классификации аномалий. В ионопроводящих породах процесс разряда идет быстро и τ обычно не превышает нескольких секунд. Меньшая скорость спада наблюдается над песками, насыщенными пресной водой. Над породами с электропроводящими включениями τ достигает сотен секунд. При этом наблюдается общая тенденция замедления процесса спада при увеличении размеров включений.

Описать процесс спада одной-двумя экспонентами удается в относительно небольшом интервале времени на начальной стадии разрядки. Для описания процесса разрядки в большом диапазоне времени потребуется много экспонент, что громоздко и для практики неудобно. Было много попыток описать весь процесс спада одним уравнением. Но все предложенные уравнения, иногда достаточно сложные, удовлетворительно описывают процесс в ограниченном интервале времени. Поэтому в настоящее время для характеристики поведения $\Delta U_{\text{ВП}}$ во времени используют способы, не требующие задания определенного закона. Одним из таких способов является определение приведенной скорости спада.

Приведенная скорость спада рассчитывается по двум значениям $\Delta U_{\text{ВП}}$, измеренным в моменты времени t_1 и t_2 по формуле:

$$v = \frac{\Delta U_{\text{ВП}}(t_1) - \Delta U_{\text{ВП}}(t_2)}{(t_1 - t_2) \Delta U_{\text{ВПсредн}}} \quad (4.14)$$

Если кривая спада распадается на две экспоненты, приведенную скорость правильнее определять для каждой экспоненты отдельно. Для классификации аномалий приведенная скорость спада используется аналогично постоянной времени τ .

Переходная характеристика. Дифференциальная кажущаяся поляризуемость. Наиболее полную информацию о

протекании процесса вызванной поляризации содержит переходная характеристика. Она представляет собой зависимость $\Delta U_{\text{ВП}}$ от времени T , отсчитываемого от момента включения тока. Чтобы исключить влияние абсолютной величины поляризуемости среды, переходную характеристику строят в относительных единицах, принимая за единицу значение $\Delta U_{\text{ВП}}$ при $T \rightarrow \infty$.

Так как переходная характеристика строится в относительных единицах, она имеет такой же вид, если вместо $\Delta U_{\text{ВП}}$ использовать η_k . Только в этом случае для вычисления η_k надо брать $U_{\text{пр}}$ для одного и того же момента времени.

Скорость процесса характеризуется величиной производной переходной характеристики по логарифму времени. Эта производная называется дифференциальной кажущейся поляризуемостью:

$$\Delta \eta_k = \frac{d(\Delta U_{\text{ВП}})}{d(\lg T)} = \frac{d\eta_k}{d(\lg T)}. \quad (4.15)$$

Дифференциальная кажущаяся поляризуемость имеет максимум при некотором значении $T=T_m$. Положение максимума зависит от скорости процесса. Чем медленнее протекает процесс, тем при большем T наблюдается максимум $\Delta \eta_k$. Пример теоретических переходных характеристик, рассчитанных при разных значениях τ для экспоненциального закона, приведен на рис. 4.25.

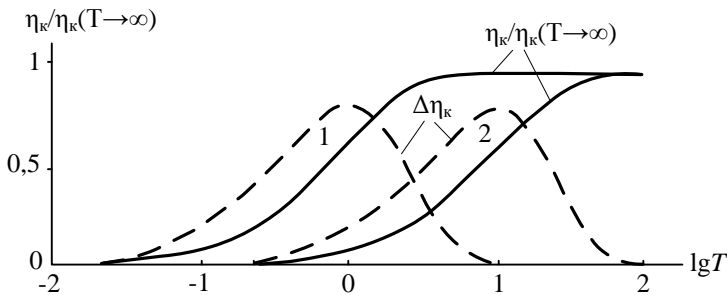


Рис. 4.25. Переходные характеристики (сплошные линии) и графики дифференциальной кажущейся поляризуемости (штриховые линии) при $\tau=1$ (1) и $\tau=10$ (2)

По изменению дифференциальной кажущейся поляризуемости в зависимости от времени T и по положению максимума $\Delta\eta_k$ (значению T_m) можно делать выводы о природе объектов, вызвавших аномалии. Над ионопроводящими породами максимум $\Delta\eta_k$ смещен в область малых T , поэтому с увеличением времени дифференциальная кажущаяся поляризуемость уменьшается. В приведенном на рис. 4.26 примере такое положение наблюдается в краевых частях профиля и между участками с высокими значениями кажущейся поляризуемости. Такая же картина, но при высоких значениях $\Delta\eta_k$, наблюдается на аномалии в правой части профиля над зоной вкрапленности во вмещающих породах. Над массивными и прожилковыми рудами процесс протекает медленно, поэтому $\Delta\eta_k$ растет до больших значений T , как это происходит над аномалией в левой половине профиля, приведенного на рис. 4.26.

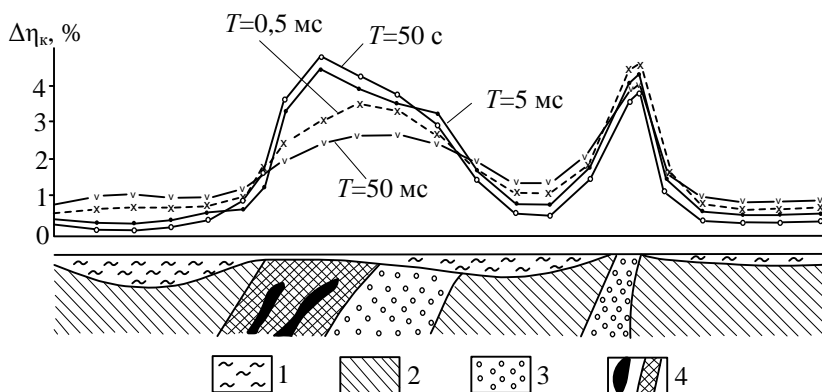


Рис. 4.26. Полевые графики дифференциальной кажущейся поляризуемости для разных моментов времени T переходного процесса ВП (по В. А. Комарову):

1 – перекрывающие осадочные породы; 2 – безрудные породы; 3 – породы с сульфидной вкрапленностью; 4 – сплошные и прожилковые руды

Получение переходной характеристики способом изменения $\Delta U_{ВП}$ во время пропускания тока технически достаточно сложно. Для этого необходимо с высокой точностью поддержи-

вать постоянство силы тока в питающей линии и фиксировать изменения $\Delta U_{\text{ВП}}$ на фоне $\Delta U_{\text{пр}}$, превышающей $\Delta U_{\text{ВП}}$ в десятки раз. Так как снятие переходной характеристики занимает достаточно большое время, сложной проблемой является борьба с помехами.

Переходную характеристику и дифференциальную кажущуюся поляризуемость можно определить по результатам измерений спада $\Delta U_{\text{ВП}}$ ($\eta_{\text{к}}$) после выключения тока. Для этого используется связь между переходной характеристикой и кривой спада. В первый момент после выключения тока при $t_{\text{сп}}=0$ начальное значение $\eta_{\text{к нач}}$ равно кажущейся поляризуемости $\eta_{\text{к0}}^{\text{зар}}$ в момент выключения тока при $T=t_{\text{зар}}$ (рис. 4.27). За время, равное длительности импульса тока $t_{\text{зар}}$, кажущаяся поляризуемость уменьшается до величины $\eta_{\text{к1}}$. Если бы ток не был выключен, за время $t_{\text{зар}}$ кажущаяся поляризуемость $\eta_{\text{к}}^{\text{зар}}$ увеличилась бы на величину $\delta\eta_{\text{к}}^{\text{зар}} = \eta_{\text{к1}}$. Таким же образом кажущаяся поляризуемость спада и приращение кажущейся поляризуемости в процессе зарядки связаны во все другие интервалы времени, равные $t_{\text{зар}}$. Описанным способом можно построить часть переходной характеристики для $T > t_{\text{зар}}$. Для построения начальной части переходной характеристики необходимо выполнить измерения при меньшем времени зарядки.

Для получения дифференциальной кажущейся поляризуемости строить переходную характеристику нет необходимости. Она может быть вычислена непосредственно по результатам измерения спада ВП по формуле:

$$\Delta\eta_{\text{к}}\left(T_{\text{сп}}\right) = \frac{d\eta_{\text{к}}^{\text{зар}}}{d(\lg T)} = \frac{\eta_{\text{к}}}{\lg\left(t_{\text{зар}} + t_{\text{сп}}\right) - \lg t_{\text{сп}}} = \frac{\eta_{\text{к}}}{P}, \quad (4.16)$$

где $t_{\text{зар}}$ – длительность импульса тока (время зарядки); $t_{\text{сп}}$ – интервал времени между моментами выключения тока и измерения $\eta_{\text{к}}$; P – коэффициент, равный

$$P = \lg(t_{\text{зар}} + t_{\text{сп}}) - \lg t_{\text{сп}} = \lg \frac{t_{\text{зар}} + t_{\text{сп}}}{t_{\text{сп}}} = \lg \left(1 + \frac{t_{\text{зар}}}{t_{\text{сп}}} \right). \quad (4.17)$$

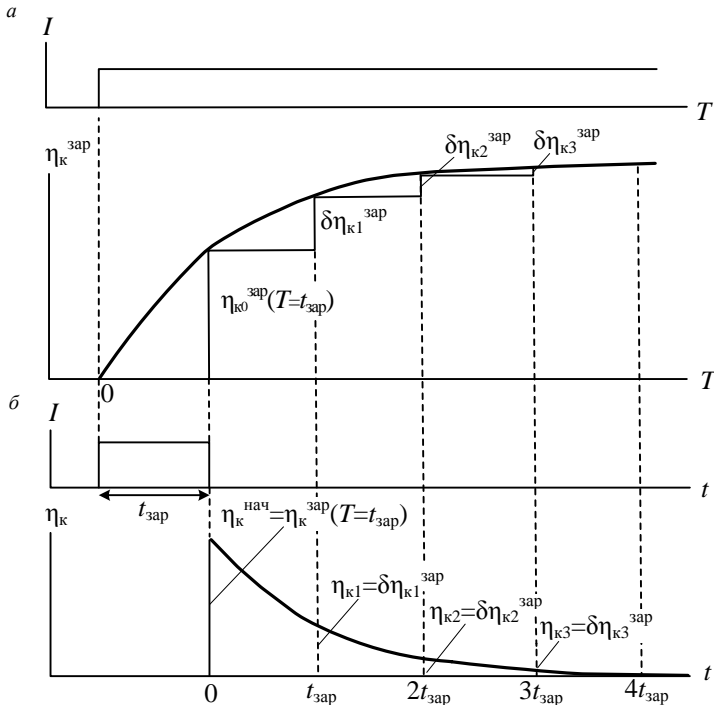


Рис. 4.27. Графики $\eta_k^{\text{зар}}$ во время пропускания длительного импульса тока (а) и η_k после выключения импульса тока длительностью $t_{\text{зар}}$ (б)

Время $T_{\text{сп}}$, к которому относится значение $\Delta\eta_k$, – это середина интервала на логарифмической шкале, по которому вычисляется $\Delta\eta_k$,

$$\lg T_{\text{сп}} = \frac{\lg(t_{\text{зар}} + t_{\text{сп}}) + \lg t_{\text{сп}}}{2}, \quad (4.18)$$

на равномерной шкале

$$T_{\text{ср}} = \sqrt{\left(t_{\text{зар}} + t_{\text{сп}} \right) t_{\text{сп}}} . \quad (4.18')$$

Положение максимума дифференциальной кажущейся поляризуемости T_M на шкале времени зависит от геологических особенностей изучаемой среды. По значению T_M могут быть сделаны выводы о природе объекта, вызвавшего аномалию. У ионопроводящих пород T_M составляет обычно доли секунды. Поэтому максимума $\Delta\eta_k$ обычно не наблюдается, $\Delta\eta_k$ монотонно убывает с течением времени. При появлении электропроводящих включений T_M увеличивается тем больше, чем крупнее включения. У вкрапленных руд T_M составляет десятки и сотни секунд, а у прожилковых и массивных руд может достигать десятков минут. Пример графиков зависимости $\Delta\eta_k$ для различных геологических образований приведен на рис. 4.28.

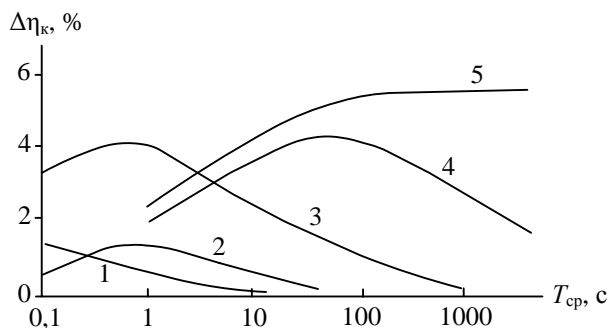


Рис. 4.28. Графики дифференциальной кажущейся поляризуемости для различных геологических объектов (по В.А. Комарову):

1 – рыхлые отложения; 2 – безрудные кристаллические породы; 3 – породы с мелкой вкрапленностью сульфидов и графита; 4 – вкрапленные сульфидные руды; 5 – массивные и прожилковые руды

На рис. 4.29, а приведены графики $\Delta\eta_k$ для нескольких значений $T_{\text{ср}}$ по профилю над медноколчеданным месторождением. В краевых частях профиля, расположенных над безруд-

ными породами, значения $\Delta\eta_k$ закономерно уменьшаются при увеличении T_{cp} . Из этого можно сделать вывод, что даже минимальное время $T_{cp}=35$ мс больше T_m . Над рудным телом картина другая. Здесь сначала при изменении T_{cp} от 35 мс до 2,5 с $\Delta\eta_k$ уменьшается, а затем растет. Судя по виду графика $\Delta\eta_k = f(T_{cp})$ (см. рис. 4.29, б), при дальнейшем увеличении времени дифференциальная кажущаяся поляризуемость продолжала бы расти, т. е. на этом участке профиля T_m больше 260 с.

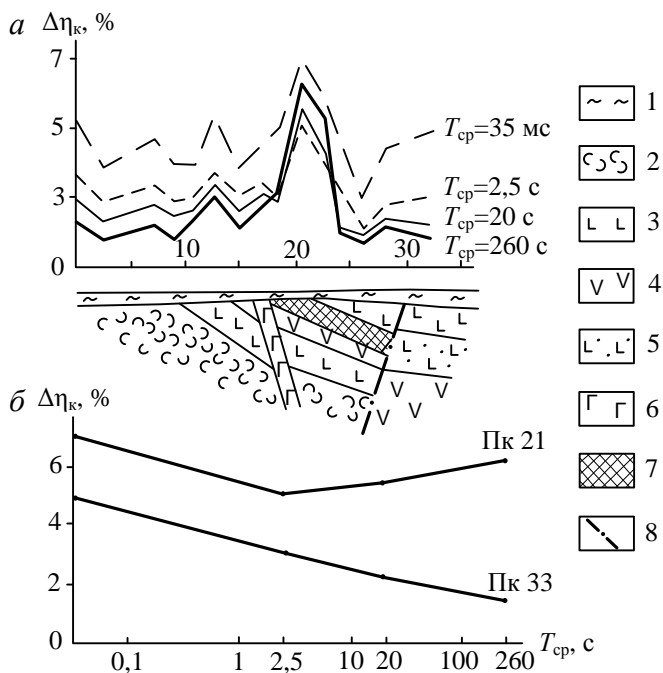


Рис. 4.29. Результаты метода вызванной поляризации на колчеданном месторождении (по материалам О. М. Шаповалова и В. К. Черныша):

а – графики $\Delta\eta_k$ по профилю; б – графики зависимости $\Delta\eta_k$ от T_{cp} .
 1 – рыхлые отложения; 2 – туфы; 3 – спилиты; 4 – порфириды; 5 – диабазы;
 6 – габбро-диабазы; 7 – медный колчедан; 8 – тектоническое нарушение

Таким образом, изучение временных характеристик вызванной поляризации при благоприятных условиях позволяет

делать выводы о геологической природе объекта, вызвавшего аномалию. Все описанные способы изучения поведения ВП во времени дают принципиально не отличающуюся информацию, но информация, которую содержит зависимость дифференциальной η_k от времени, более полная. При выборе того или иного способа следует ориентироваться на то, какой из параметров может быть определен более надежно и на имеющиеся возможности.

4.9. Поверхностная вызванная поляризация

Объемная поляризация пород, содержащих электропроводящие включения, является следствием поверхностной поляризации каждого из включений. Так как при электроразведочных измерениях применяются установки, размер которых на несколько порядков превышает размер вкрапленников, наблюдается суммарный эффект, пропорциональный дипольному моменту единицы объема $P_{ВП}$. Если массивный электропроводящий объект имеет размер, сопоставимый с размерами установки, наблюдается вторичное поле, вызванное его поверхностной поляризацией.

При поверхностной поляризации по обе стороны поляризующегося включения образуются скопления электрических зарядов. Это дополнительные заряды внешней обкладки двойного слоя, образовавшиеся в результате перенапряжения разряда, и неразрядившиеся ионы в прилегающем к поверхности включения электролите. Поляризующееся включение становится источником электрического поля с э. д. с.

$$\mathcal{E}_{ВП} = \lambda E_1, \quad (4.19)$$

где λ – коэффициент поверхностной поляризации; E_1 – напряженность поля во вмещающей среде.

Так как заряды внутренней обкладки двойного слоя имеют противоположный знак по отношению к внешней обкладке, на границе раздела "электролит – включение" потенциал испытывает скачок. Скачок потенциала пропорционален λ и нор-

мальной по отношению к границе раздела компоненте напряженности поля в электролите. Для шара

$$U_1 \Big|_{r=a} - U_2 \Big|_{r=a} = \lambda \frac{\partial U_1}{\partial r} \Big|_{r=a} = -\lambda E_{1r}. \quad (4.20)$$

В случае объемной поляризации потенциал при переходе через границу раздела объекта и вмещающей среды непрерывен. Разница в граничных условиях для случая поверхностной и объемной поляризации приводит к различному поведению графиков потенциала и напряженности поля по профилю, пересекающему объект.

Задача об электрическом поле в присутствии поверхностно поляризующегося шара решается так же, как для неполяризующегося объекта. Только при составлении уравнений для определения коэффициентов интегрирования надо изменить граничное условие для потенциала в соответствии с выражением (4.20). Из-за этого в решении изменится только коэффициент, определяющий зависимость от соотношения параметров объекта и среды. Координатная функция при этом не изменится.

Чтобы получить выражение для потенциала точечного источника в присутствии поверхностно поляризующегося объекта во внешней области, надо в числителе первого уравнения системы (2.1) заменить ρ_2 на $\rho_2 + \rho_1 \lambda / a$. Для получения решения во внутренней области надо в числителе второго уравнения этой системы вместо ρ_2 подставить $\rho_2 - 2\rho_1 \lambda / a$. В знаменателе в обоих уравнениях ρ_2 заменяется на $\rho_2 + \rho_1 \lambda / a$.

В случае однородного первичного поля в суммах сохраняется только первый член ряда. Поле в случае неполяризующегося шара (без учета границы "земля-воздух") определяется уравнениями (2.2) и (2.3). Для поверхностно поляризующегося шара уравнения принимают вид:

$$U_1 = -E_0 x + \frac{\rho_1 - (\rho_2 + \rho_1 \lambda / a)}{\rho_1 + 2(\rho_2 + \rho_1 \lambda / a)} E_0 a^3 \frac{x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (4.21)$$

$$U_2 = -E_0 x + \frac{\rho_1 - (\rho_2 + \rho_1 \lambda / a)}{\rho_1 + 2(\rho_2 + \rho_1 \lambda / a)} E_0 x. \quad (4.22)$$

Из формулы (4.21) следует, что поверхностная поляризация оказывает на электрическое поле во вмещающей среде такое же влияние, как увеличение сопротивления объекта. Такое же влияние оказывает и объемная поляризация. Следовательно, вид аномалий η_k от поверхностно и объемно поляризованных объектов одинаковый.

Внутри объекта, согласно формуле (4.22), влияние поверхностной поляризации эквивалентно уменьшению его сопротивления. Это объясняется тем, что по направлению первичного поля потенциал вызванной поляризации внутри объекта повышается и ток ВП течет навстречу первичному полю (рис. 4.30, *а*). В случае объемной поляризации потенциал ВП внутри объекта по направлению первичного поля уменьшается и направления первичного поля и поля ВП совпадают (см. рис. 4.30, *б*). Поэтому влияние объемной поляризации на электрическое поле во внутренней области эквивалентно увеличению сопротивления объекта.

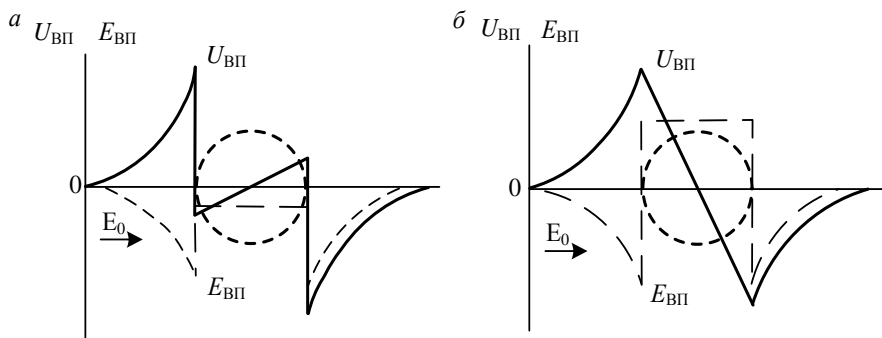


Рис. 4.30. Графики потенциала и напряженности поля ВП по профилю, пересекающему поверхностно поляризующийся (*а*) и объемно поляризующийся (*б*) шар

Влияние поверхностной поляризации на электрическое поле, а следовательно и интенсивность аномалии η_k , зависит от

величины λ/a . Когда коэффициент поверхностной поляризации больше размера объекта, это влияние может быть значительным. Для крупных объектов, радиус которых больше λ , влияние поверхностной поляризации невелико.

Чтобы оценить аномалию η_k от поверхностно поляризованного шара во внешней области, которая нас обычно интересует, продифференцируем уравнение (4.21) по координате x , т. е. по направлению первичного поля. Затем можно найти кажущуюся поляризуемость обычным способом:

$$\eta_k = 1 - \frac{E_x^{(0)}}{E_x}, \quad (4.23)$$

где $E_x^{(0)}$ – напряженность поля при отсутствии ВП (при $\lambda=1$). Так как поверхностно поляризуются электропроводящие минералы, удельное сопротивление которых на несколько порядков меньше сопротивления вмещающей среды, положим $\rho_2 \ll \rho_1$. Это значительно уменьшит громоздкость выражения η_k . В этом случае аномальная кажущаяся поляризуемость на поверхности земли

$$\eta_{ka} = \frac{\frac{6\lambda/a}{1+2\lambda/a} a^3 \frac{y^2 + h^2 - 2x^2}{\left(x^2 + y^2 + h^2\right)^{5/2}}}{1 - 2 \frac{1-\lambda/a}{1+2\lambda/a} a^3 \frac{y^2 + h^2 - 2x^2}{\left(x^2 + y^2 + h^2\right)^{5/2}}}. \quad (4.24)$$

Максимальная аномалия η_k наблюдается над центром объекта, т. е. при $x=y=0$. В этой точке

$$\eta_{\text{ка}}^{\text{макс}} = \frac{\frac{6\lambda / a \left(\frac{a}{h} \right)^3}{1 + 2\lambda / a \left(\frac{a}{h} \right)^3}}{1 - 2 \frac{1 - \lambda / a \left(\frac{a}{h} \right)^3}{1 + 2\lambda / a \left(\frac{a}{h} \right)^3}}. \quad (4.25)$$

Рассмотрим конкретный пример. Пусть $\lambda=0,3$ м. Это высокий коэффициент поверхностной поляризации. Максимальное его значение имеет чистая медь, у которой $\lambda \approx 1$ м. Отношение a/h примем равным $0,7$ ($h/a \approx 1,5$). Пусть объект представляет собой рудный вкрапленник диаметром 1 см. При этих условиях $\lambda/a=60$. Максимальная аномалия $\eta_{\text{ка}}^{\text{макс}} = 0,7646 = 76,46\%$. Такая интенсивная аномалия наблюдается на малом расстоянии от зерна, в нашем случае всего $7,5$ мм от его центра. Так как аномалия убывает обратно пропорционально кубу расстояния, уже в нескольких десятках сантиметров от включения $\eta_{\text{к}}$ уменьшается до первых десятых долей процента.

Теперь оценим аномалию от небольшого рудного тела с $a=50$ м. В этом случае $\lambda/a=0,006$ и $\eta_{\text{ка}}^{\text{макс}} = 0,0184 = 1,84\%$.

Для сравнения рассмотрим аномалию от такого же объекта, сложенного густой рудной вкрапленностью. Пусть его избыточная поляризуемость $\eta_{\text{изб}}=30\%$. Напряженность поля в присутствии объемно поляризующегося объекта рассчитывается по формуле для такого же неполяризующегося тела, только вместо его истинного удельного сопротивления ρ_2 надо подставить эффективное сопротивление $\rho_2^* = \rho_2 / (1 - \eta_2)$. Кажущаяся поляризуемость рассчитывается по формуле (4.23), как и в случае поверхностной поляризации. В точке с координатами $x=y=0$, где аномалия максимальная,

$$\eta_{\text{ка}}^{\text{макс}} = \frac{6\mu\eta_{\text{изб}}}{(1+2\mu) \left[(h/a)^3 (1-\eta_{\text{изб}}+2\mu) - 2(1-\eta_{\text{изб}}-\mu) \right]}. \quad (4.26)$$

В случае объемной поляризации аномалия зависит от отношения удельных сопротивлений объекта и вмещающей среды. Наибольшая интенсивность аномалии для изометричных тел наблюдается, когда ρ_2 в несколько раз меньше ρ_1 . Примем $\mu = \rho_2 / \rho_1 = 0,3$. В заданных условиях аномалия от объемно поляризующегося объекта $\eta_{\text{ка}}^{\text{макс}} = 0,0604 = 6,04 \%$, т. е. превышает аномалию от такого же поверхностно поляризующегося тела почти в 3,5 раза.

Таким образом, в формировании аномалий $\eta_{\text{к}}$ от рудных объектов основную роль играет не поверхностная поляризация массивных рудных тел, а объемная поляризация ореолов вкрапленной минерализации. Но наличие внутри ореола вкрапленности массивного, а следовательно, хорошо проводящего тела приводит к увеличению интенсивности аномалии. Это происходит из-за натекания тока в проводящее ядро, приводящего к увеличению плотности тока во вкрапленной оболочке и возрастанию $\eta_{\text{ка}}$. В. А. Комаровым решена задача об аномалии $\eta_{\text{к}}$ над электропроводящим шаром, окруженным объемно поляризующейся оболочкой рудной вкрапленности. Пример зависимости увеличения интенсивности аномалии, вызванного проводящим ядром, от отношения его радиуса a к радиусу вкрапленной оболочки A приведен на рис. 4.31. Сначала при увеличении радиуса проводящего ядра приращение аномалии растет, достигает максимума, а затем, когда оболочка становится слишком тонкой ($a/A \rightarrow 1$), резко уменьшается до нуля. Рост аномалии тем больше, чем меньше глубина до верхней кромки ореола. При выходе ореола на поверхность наблюдений амплитуда аномалии может увеличиваться в 2-3 раза.

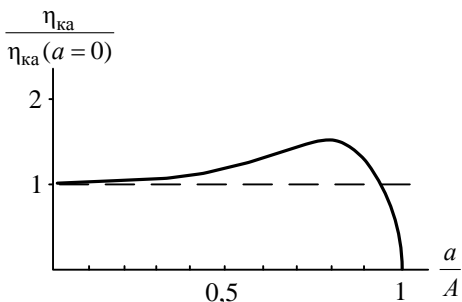


Рис. 4.31. Графики η_k зависимости аномалии от соотношения радиуса a массивного проводника и радиуса A ореола вкрапленности (по В. А. Комарову)

Влияние ядра с очень низким удельным сопротивлением является одной из причин того, что над сплошными рудными телами, залегающими в минерализованных зонах, иногда наблюдается локальное увеличение интенсивности аномалии η_k . Обычно это бывает при неглубоком залегании оруденения.

Эффект поверхностной вызванной поляризации можно использовать при поисках мелких металлических предметов, находящихся в земле на небольшой глубине, например, в археологии.

4.10. Нелинейная вызванная поляризация

Обычно процесс вызванной поляризации полагают линейным. Поле ВП, по крайней мере при такой плотности тока, какая создается при электроразведочных наблюдениях, пропорционально первичному полю. При изменении направления первичного поля на противоположное соответственно изменяется и направление поля ВП. Но в случае поверхностно поляризующихся электропроводящих объектов кроме линейной вызванной поляризации появляется нелинейная компонента – НВП. Феноменологически она проявляется в том, что при пропускании одинакового тока в противоположных направлениях поле ВП несколько различается по величине. Это происходит потому, что в отличие от линейной компоненты, нелинейная компонента при изменении направления первичного поля своей полярности не меняет:

при полярности питающей линии A^+B^- $\Delta U_{ВП} = \Delta U_{ВП}^{лин} + \Delta U_{НВП}$,

при полярности питающей линии A^-B^+ $\Delta U_{ВП} = -\Delta U_{ВП}^{лин} + \Delta U_{НВП}$.

Таким образом, разность $\Delta U_{ВП}$, измеренных при противоположных направлениях первичного поля, равна удвоенной $\Delta U_{ВП}^{лин}$, сумма этих $\Delta U_{ВП}$ равна $2\Delta U_{НВП}$.

Амплитуда НВП в реальных условиях во много раз меньше амплитуды линейной ВП. Поэтому непосредственное ее определение путем сравнения результатов измерений, полученных при разной полярности питающих заземлений, в реальных условиях осуществить трудно. Для измерения НВП используют специальные приемы.

При рассмотрении поверхностной поляризации полагаюсь, что поляризующийся объект в электрическом отношении симметричен, т. е. его катодная (куда входит ток) и анодная (откуда ток выходит) части поляризуются одинаково ($\lambda_k = \lambda_a$). При нелинейной поляризации $\lambda_k \neq \lambda_a$ и одна из частей, например, катодная, поляризуется сильнее, чем другая. Рассмотрим очень упрощенную, но наглядную модель нелинейной поляризации помещенного в электролит электропроводного шара, данную С. М. Шейнманном [37].

Энергетический барьер, который преодолевают электрические заряды при переходе границы между электролитом и твердым телом, можно условно заменить окружающей включение тонкой оболочкой с поперечным сопротивлением R_r . Если это сопротивление в левой и правой части шара одинаково, катодная и анодная зоны занимают по половине поверхности шара, граница между ними проходит по большому кругу, перпендикулярному к первичному электрическому полю. В этом случае средняя плотность тока на поверхности катодной и анодной зон одинакова. Такие условия соответствуют случаю $\lambda_k = \lambda_a$, когда скачок потенциала в обеих зонах имеет одинаковую величину.

Если коэффициенты поверхностной поляризации в катодной и анодной зонах различаются, различаются скачки по-

тенциала и различаются сопротивления R_{rk} и R_{ra} . Пусть $\lambda_k > \lambda_a$, тогда и $R_{rk} > R_{ra}$. Ток, втекающий в объект, должен быть равен вытекающему из него току. Так как $R_{rk} > R_{ra}$, плотность тока в катодной зоне меньше, чем в анодной. Поэтому для соблюдения условия равенства втекающего и вытекающего токов катодная зона должна занимать больше половины поверхности шара. Граница катодной и анодной зон при этом смещается в сторону анода, в нашем случае вправо (рис. 4.32, *a*). При изменении направления первичного поля на противоположное катодная и анодная зоны меняются местами и граница между ними смещается влево от центра шара (см. рис. 4.32, *б*).

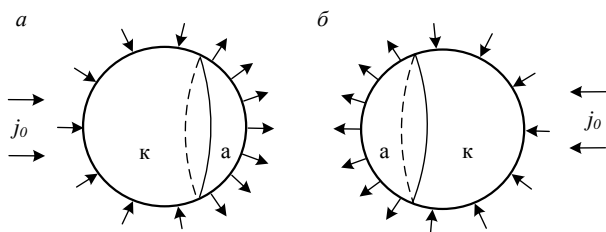


Рис. 4.32. Перемещение границы между катодной и анодной зонами при перемене направления тока

При любом направлении внешнего поля в поясе между двумя положениями границы катодной и анодной зон ток втекает в шар. Поэтому объект приобретает отрицательный потенциал НВП, который складывается со знакопеременным потенциалом линейной ВП. В результате суммарный потенциал ВП уменьшается и уже не меняет знак в центре шара, как в случае отсутствия НВП, показанном на рис. 4.30, *a*.

Реальный процесс нелинейной вызванной поляризации протекает более сложно. К различию скачков потенциала в катодной и анодной зонах добавляется различие в процессах зарядки и разрядки двойного слоя. Происходящие в поляризующемся объекте процессы отражаются и на поведении поля ВП во внешней области. Теоретические графики потенциала ВП при наличии нелинейной вызванной поляризации приведены на рис. 4.33.

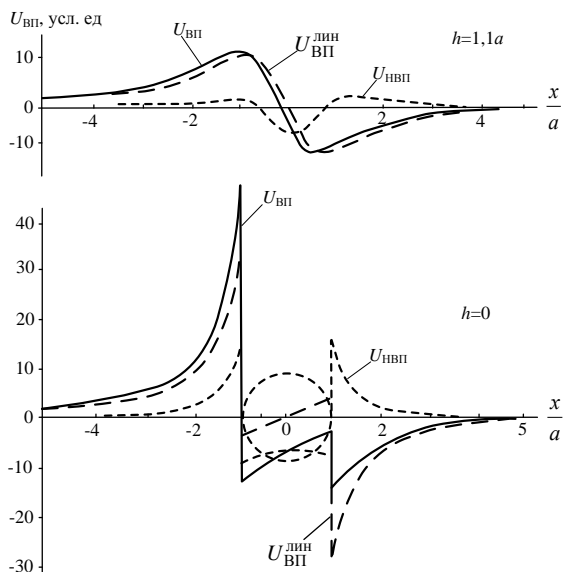


Рис. 4.33. Теоретические графики $U_{ВП}$ в случае электропроводного шара с $\lambda_k > \lambda_a$ (по В. А. Комарову)

Если внешнее поле переменное, в области между двумя положениями границы катодной и анодной зон, где ток всегда втекает в объект, происходит выпрямление тока и появляется постоянная компонента потенциала, в нашем случае отрицательная. Если $\lambda_k < \lambda_a$, ток в этой области, напротив, вытекает из объекта и постоянная компонента потенциала имеет положительный знак. На этом явлении основан принцип измерения НВП.

Для измерения НВП создается переменное первичное поле и тем или иным способом измеряется постоянная составляющая потенциала. При измерениях используются неполяризуемые электроды. Неподвижный электрод устанавливается за пределами исследуемого участка, а подвижный перемещается по профилю. Для измерения $U_{НВП}$ можно использовать комбинацию переменного поля и импульсов постоянного тока. При включении постоянного тока мнимая компонента поля, если

$U_{\text{НВП}}$ отрицательный – уменьшается, если $U_{\text{НВП}}$ положительный – увеличивается.

Измерение НВП позволяет разделить аномалии, вызванные рудными объектами и графитизированными породами. У большинства рудных объектов $\lambda_{\text{к}} > \lambda_{\text{а}}$ и потенциал НВП отрицательный. У графита $\lambda_{\text{к}} < \lambda_{\text{а}}$ и над ним образуются положительные аномалии НВП. Полевые примеры результатов измерения НВП над полиметаллическим рудным телом и над пластом графита приведены на рис. 4.34 и 4.35.

Рис. 4.34. Результаты работ на колчеданно-полиметаллическом месторождении на Рудном Алтае (по В. А. Комарову):
1 – тектоническое нарушение;
2 – эффузивные породы; 3 – рудное тело

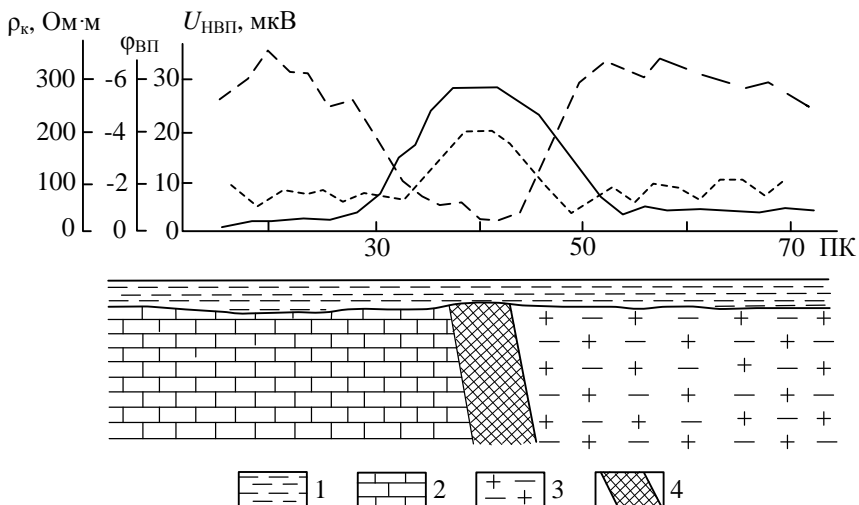
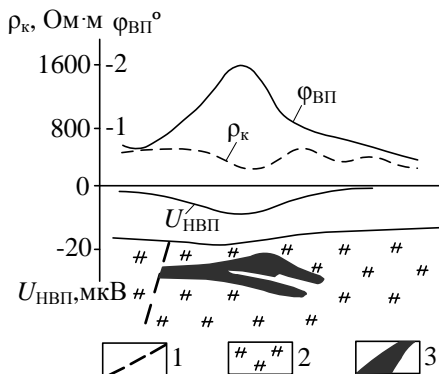


Рис. 4.35. Графики над графитовым месторождением (по В. А. Комарову и др.):

1 – песчано-глинистые отложения; 2 – карбонатные породы; 3 – гнейсы; 4- пласт графита

В обоих случаях выполнены фазовые измерения вызванной поляризации (на частотах 2,44 и 1,22 Гц соответственно) и получены четкие аномалии. Над полиметаллическим рудным телом $\varphi_{ВП}$ достигает -2° , над пластом графита -6° ($\varphi_{ВП}=1^\circ$ соответствует $\eta_k=3\%$). Потенциал НВП над полиметаллическим рудным телом имеет отрицательный знак и по амплитуде достигает 10 мкВ. График $U_{НВП}$ имеет такую же форму, как график $\varphi_{ВП}$. Над графитом наблюдается положительная аномалия $U_{НВП}$, по форме также совпадающая с аномалией $\varphi_{ВП}$.

4.11. Измерение вызванной поляризации на переменном токе

При пропускании переменного тока через поляризующуюся среду, как и в поле постоянного тока, среда поляризуется. Разность потенциалов ВП при этом тоже переменная, имеет ту же частоту, что и первичное поле, но сдвинута по фазе на отрицательный угол. Суммарная $\Delta\tilde{U}$ в этом случае не совпадает по фазе с первичным полем (током в кабеле) и может быть разложена на вещественную ($\text{Re}\Delta\tilde{U}$) и мнимую ($\text{Im}\Delta\tilde{U}$) компоненты, т. е. на синфазную с током и сдвинутую относительно него на угол $-\pi/2$.

Зависимость $\text{Re}\Delta\tilde{U}$ от $1/\omega$ подобна переходной характеристике для случая постоянного тока ($\omega=2\pi f$ – круговая частота). График зависимости мнимой компоненты $\Delta\tilde{U}$ от $1/\omega$ аналогичен графику зависимости дифференциальной кажущейся поляризуемости от времени $T_{ср}$. Если ВП изменяется по экспоненциальному закону, максимум $\Delta\eta_k$ в случае постоянного тока наблюдается при $T=\tau$, максимум $\text{Im}\Delta\tilde{U}$ в поле переменного тока – при $1/\omega_{ср}=\tau$.

Амплитуда результирующей разности потенциалов

$$A = \sqrt{(\text{Re}\Delta\tilde{U})^2 + (\text{Im}\Delta\tilde{U})^2}, \quad (4.27)$$

фазовый сдвиг

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \Delta \tilde{U}}{\operatorname{Re} \Delta \tilde{U}}. \quad (4.28)$$

Таким образом, разность потенциалов, измеренная в поле переменного тока в поляризуемой среде, отличается от разности потенциалов первичного поля (т. е. в неполяризуемой среде) по амплитуде и фазе. На этом основано измерение ВП на переменном токе. В зависимости от того, какая характеристика поля изучается, различают амплитудные и фазовые измерения. Так как $\Delta \tilde{U}$ первичного поля неизвестна, производят измерения амплитуды на двух частотах и определяют кажущуюся поляризуемость по разнице результатов. Так же поступают и при фазовых измерениях, чтобы избавиться от необходимости передачи опорной фазы на измерительный прибор с генераторной установки. Для определения фазы можно также выполнять квадратурные измерения на одной частоте, а затем по формуле (4.28) вычислять $\varphi_{\text{ВП}}$.

При амплитудных измерениях можно определять кажущуюся поляризуемость на переменном токе

$$\tilde{\eta}_k = \frac{\Delta \tilde{U} / I(\omega_1) - \Delta \tilde{U} / I(\omega_2)}{\Delta \tilde{U} / I(\omega_1)} = \frac{\rho_k(\omega_1) - \rho_k(\omega_2)}{\rho_k(\omega_1)}, \quad (4.29)$$

где $\rho_k(\omega_1)$ и $\rho_k(\omega_2)$ – кажущиеся сопротивления, измеренные на частотах ω_1 и ω_2 ($\omega_1 < \omega_2$). Эту величину, как и в случае постоянного тока, можно выражать в долях единицы или в процентах. За рубежом обычно используют десятикратное изменение частоты. Для таких измерений существует несколько типов канадской аппаратуры. При этом кажущуюся поляризуемость называют процентным частотным фактором – PFF (Percent Frequency Factor).

Другой вариант амплитудных измерений – определение коэффициента частотной дисперсии

$$K_{\text{д}} = \frac{\rho_{\text{к}}(\omega_1) - \rho_{\text{к}}(\omega_2)}{\rho_{\text{к}}(\omega_1)} \cdot \frac{1}{\lg(\omega_2/\omega_1)}. \quad (4.30)$$

Эта величина является аналогом дифференциальной кажущейся поляризуемости, измеренной на постоянном токе. Роль $T_{\text{ср}}$ в этом случае играет величина $1/\omega_{\text{ср}} = 1/\sqrt{\omega_1\omega_2}$. Зависимость $K_{\text{д}}$ от $1/\omega_{\text{ср}}$ такая же, как зависимость $\Delta\eta_{\text{к}}$ от $T_{\text{ср}}$ и может быть аналогичным образом использована для классификации аномалий.

Фазовый сдвиг $\varphi_{\text{ВП}}$ тоже связан с кажущейся поляризуемостью на постоянном токе:

$$\Delta\eta_{\text{к}}, \% \approx 3|\varphi_{\text{ВП}}^{\circ}|. \quad (4.31)$$

Для фазовых измерений в нашей стране создан ряд моделей аппаратуры, работающих на одинаковом принципе (ВП-Ф, ЭВП-203, ЭВА-203 и др.). Для определения $\varphi_{\text{ВП}}$ измеряется фазовый сдвиг между сигналами $\Delta\tilde{U}$ для двух частот, различающихся между собой в 3 раза. Полагая, что на более высокой частоте эффект вызванной поляризации мал, разность фаз сигналов принимается за $\varphi_{\text{ВП}}$. В более совершенных типах аппаратуры используется еще третья частота, отличающаяся от основной в 5 раз. При трехчастотных измерениях в меньшей степени проявляется влияние индукционных эффектов.

Наличие индукционных эффектов при фазовых измерениях устанавливается по появлению положительных значений $\varphi_{\text{ВП}}$. Если такие значения появляются в значительном количестве (более 5%), измерения следует считать браком. В этом случае надо перейти на более низкую частоту или уменьшить размер установки.

4.12. Изучение ранней стадии вызванной поляризации

Принцип метода изучения ранней стадии вызванной поляризации (РСВП). К ранней стадии вызванной поляризации относятся процессы, протекающие в период приблизительно до 10 мс после включения или выключения тока в питающей ли-

нии. По своей физической природе эти процессы отличаются от процессов, протекающих на более поздних стадиях.

В позднюю стадию возникновения ВП связано с перегруппировкой ионов в жидкой фазе горной породы. Основную роль на этой стадии играет концентрационная и отчасти адсорбционная поляризация. На ранней стадии появление ВП вызвано процессами, происходящими в двойном электрическом слое на границе твердой и жидкой фаз. Если твердая фаза представлена проводящими минералами, главную роль в этих процессах играет перенапряжение двойного электрического слоя. Поэтому протекание процесса вызванной поляризации в ранней стадии зависит от электрохимических свойств поляризующихся минералов и, следовательно, от их химического состава. Это создает дополнительные предпосылки для установления геологической природы аномалий.

При изучении РСВП измерения производятся как в паузе между импульсами тока, так и во время пропускания тока. Длительность токовых импульсов составляет 15-20 мс. Первое измерение производится через 0,1 мс, последнее – через 12,8 или 20 мс (в зависимости от аппаратуры). Между первым и последним измерениями выполняется 9 промежуточных измерений. В процессе пропускания тока его сила не стабилизируется. Стабильным поддерживается напряжение генератора.

Использование при интерпретации результатов измерений ВП в импульсе и в паузе позволяет лучше выделять поляризующиеся объекты, расположенные под приемной линией, на фоне поляризующейся вмещающей среды. Если среда однородная, она одинаково поляризуется во всех точках – на участке линии *MN* и вблизи питающих заземлений. Поэтому при пропускании тока нарастание $\Delta U_{ВП}$ компенсируется уменьшением омического падения напряжения $\Delta U^{(0)}$ из-за уменьшения силы тока в питающей линии. Вследствие этого измеряемая разность потенциалов изменяется мало или даже уменьшается (см. рис. 4.21, *a, в*). Кажущаяся поляризуемость, рассчитанная по результатам измерения $\Delta U_{ВП}$ в импульсе, в этом случае мала. Измеренная после выключения тока $\Delta U_{ВП}$ в паузе не зависит от

изменения тока в процессе зарядки. Рассчитанная по ней η_k характеризует поляризуемость среды так же, как η_k , измеренная в поздней стадии.

Если вблизи приемной линии располагается объект, поляризующийся сильнее, чем вмещающая среда, нарастание $\Delta U_{ВП}$ превышает уменьшение $\Delta U^{(0)}$, вызванное уменьшением силы тока, и измеряемая в импульсе ΔU растет (см. рис. 4.21, б). Рассчитанная по $\Delta U_{ВП}$, измеренной в импульсе, η_k в этом случае повышена, что указывает на наличие поляризующегося объекта. После выключения тока на электродах MN наблюдается суммарная $\Delta U_{ВП}$, вызванная поляризацией среды и объекта.

Таким образом, по η_k , измеренной в импульсе, выявляются аномалии от поляризующихся объектов на фоне низких фоновых значений кажущейся поляризуемости.

Результаты измерений РСВП представляются в виде графиков кажущейся поляризуемости, измеренной в импульсе:

$$\eta_k = \frac{\Delta U(T_\phi) - \Delta U(0,1)}{\Delta U(0,1)} 100\% . \quad (4.32)$$

В этой формуле $\Delta U(T_\phi)$ – разность потенциалов, измеренная в конце импульса тока. Для получения переходной характеристики используются результаты измерений при всех значениях T от 0,1 мс до T_ϕ .

Кроме кажущейся поляризуемости обязательно определяется приведенная скорость нарастания $\Delta U_{ВП}$ в интервале времени от 0,1 до 0,2 мс:

$$S_k = \frac{\Delta U(0,2) - \Delta U(0,1)}{\left[\Delta U(T_\phi) - \Delta U(0,1) \right] \cdot 0,1} \text{ [мс}^{-1}\text{]} . \quad (4.33)$$

Вычисление η_k и S_k может производиться в процессе полевых работ, позволяя выделять наиболее интересные участки для более детального изучения. При окончательной обработке результатов работ на аномальных участках вычисляется диффе-

ренциальная кажущаяся поляризуемость и определяется время T_m , при котором $\Delta\eta_k$ достигает максимальной величины.

Кроме определения $\Delta\eta_k$, S_k и T_m в импульсе эти параметры могут определяться и по измерениям в паузе. В этом случае они характеризуют суммарную поляризуемость среды и объектов.

Аппаратура и методика изучения РСВП. Для изучения РСВП малыми сериями выпускалась специальная аппаратура: С-003, С-014, С-038. Для примера кратко рассмотрим характеристики аппаратуры С-003. Она состоит из четырех блоков: генератора, блока питания генератора, измерителя и калибратора. Генератор мощностью 400 Вт дает максимальное напряжение 400 В и ток 1 А. Он вырабатывает импульсы длительностью 25 мс с паузами такой же продолжительности. Выходное напряжение стабилизировано.

Измеритель имеет пределы измерения для $\Delta U_{пр}$ 10–3000 мВ, для $\Delta U_{ВП}$ 3–3000 мВ. Первое измерение выполняется через 0,1 мс после коммутации тока, последнее – через 20 мс, т. е. в конце импульса. Между первым и последним измерениями производится 9 промежуточных измерений. Точность

измерения $\Delta U_{ВП}$ во время импульса обеспечивается тем, что измеряется не только полное значение $\Delta U_{пр}$, но и отдельно приращение ΔU в моменты измерения относительно начального значения $\Delta U(0,1)$ при $T=0,1$ мс. Синхронизация работы измерителя и генератора осуществляется по фронтам импульсов ΔU , вызванных импульсами тока.

При выполнении измерений через малые промежутки времени после включения или выключения тока в питающей линии усиливается влияние электродинамических помех, связанных с индукционными и емкостными эффектами. Наибольшую интенсивность эти помехи имеют, когда приемная линия располагается между питающими заземлениями в средней ее части. Поэтому наиболее часто применяемые установки среднего градиента и симметричная при измерениях РСВП мало пригодны.

Индукционные и емкостные эффекты ослабляются, когда в линейной установке приемные заземления вынесены за пределы питающей линии или когда приемная и питающая линии ортогональны. Такие установки и используются при изучении ранней стадии вызванной поляризации.

Установки первого из названных типов (рис. 4.36, *a*) используются при профилировании с одновременным перемещением всех заземлений. Наибольшая интенсивность аномалии, а, следовательно, и глубина исследования, достигается при разносе AB , десятикратно превышающем глубину до объекта. Расстояние от заземления A до приемной линии делается небольшим – 10-20 м. В этом случае влияние электродинамических эффектов мало. Относительно большая интенсивность аномалии достигается за счет возбуждения объекта вертикальной компонентой поля источника A . Тем не менее глубина исследования такой установкой невелика.

Большой глубиной обладают ортогональные установки. В них измерения выполняются в поле неподвижных питающих заземлений. Наиболее простой является установка, в

которой приемная линия перемещается по профилю, проходящему через заземление A , а другое питающее заземление B отнесено по нормали к профилю (см. рис. 4.36, б). В однородной среде в такой установке электродинамические помехи практически отсутствуют. Но в неоднородной среде они могут быть достаточно интенсивными.

Более эффективно электродинамические помехи подавляются в ортогональной установке с двумя питающими заземлениями B и B' , расположенными по разные стороны от линии профиля. Все питающие заземления расположены на одной прямой, перпендикулярной к профилю (см. рис. 4.36, в). Токи на заземлениях B и B' должны быть одинаковыми, равными половине тока на заземлении A .

Принципы интерпретации результатов изучения РСВП. Интерпретация результатов измерений РСВП в паузе не отличается от интерпретации результатов измерений ВП в поздней стадии. Повышенными значениями η_k в этом случае отмечаются как локальные поляризующиеся объекты, так и области рассеянной вкрапленной минерализации.

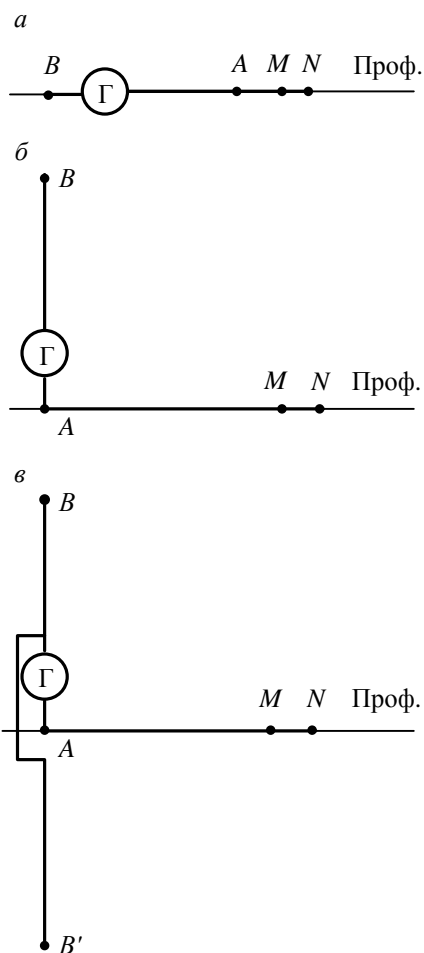


Рис. 4.36. Типы установок, применяющихся при изучении РСВП

Особенностью результатов измерений в импульсе являются близкие к нулю или небольшие отрицательные значения η_k , если поляризуется вся среда (см. рис. 4.21, в). Положительные аномалии η_k наблюдается, когда вблизи приемной линии располагается объект, обладающий большей поляризуемостью, чем вмещающая среда. Такие аномалии и представляют интерес.

Для классификации аномалий определенные возможности дает различие физических процессов, приводящих к возникновению ВП в ранней и поздней стадии. В поздней стадии основными процессами являются адсорбционная и концентрационная поляризация. В ранней стадии ВП возникает в результате перенапряжения двойного слоя. В первом случае интенсивность аномалии ВП тем больше, чем больше электрохимическая активность электропроводящих минералов. В ранней стадии эта зависимость обратная, т. е. более интенсивные аномалии вызывают минералы с низкой электрохимической активностью.

Высокой электрохимической активностью обладает пирит ранних, дорудных генераций. Более поздние сульфиды рудной генерации электрохимически менее активны и на ранней стадии поляризуются сильнее. Поэтому на фоне дорудной пиритизации продуктивная минерализация выделяется более интенсивными аномалиями.

Более сильным инструментом классификации аномалий РСВП является анализ временных характеристик. Приведенная скорость S увеличения $\Delta U_{ВП}$ в начале зарядки различна для дорудного пирита и сульфидов рудной фазы. На рис. 4.37 приведены кривые распределения S для пирита и галенита на полиметаллическом месторождении по данным измерений образцов. На профиле, расположенном на фланге месторождения для пирита, мода S равна 1 мс^{-1} , а для галенита – $0,6 \text{ мс}^{-1}$ (см. рис. 4.37, б). На профиле, проходящем через центральную часть месторождения, для галенита модальное значение S такое же, а для пирита распределение S бимодальное. Большее модальное значение около $1,2 \text{ мс}^{-1}$, а меньшее – близко к модальному значению галенита (см. рис. 4.37, а). По-видимому, эти модальные

значения соответствуют пиритам, образовавшимся в дорудную и продуктивную стадии.

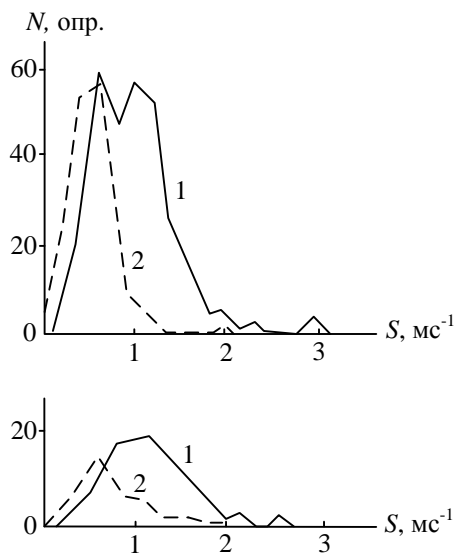


Рис. 4.37. Кривые распределения S пирита (1) и галенита (2) Ново-Широкинского месторождения (по А. П. Карасеву и др.):
a – центральная часть месторождения; *б* – фланг

При статистической обработке результатов полевых исследований на ряде месторождений Забайкалья содержащие электропроводящие минералы горные породы были разделены по S_k на три группы. Эти же группы были выделены по времени T_m , при котором наблюдается максимум дифференциальной кажущейся поляризуемости (рис. 4.38 и 4.39).

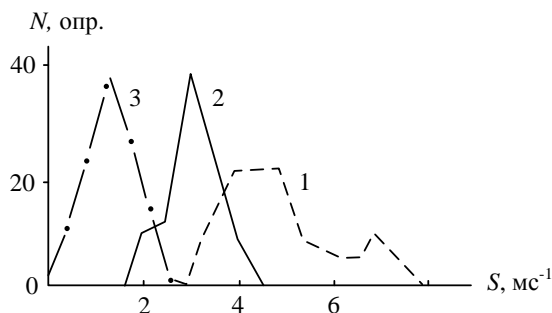


Рис. 4.38. Кривые распределения S_k над различными горными породами (по А. П. Карасеву и др.):
 1 – пиритизированными вмещающими породами; 2 – над рудными телами полиметаллических, золотосульфидных и меднопорфировых месторождений; 3 – над графитизированными породами

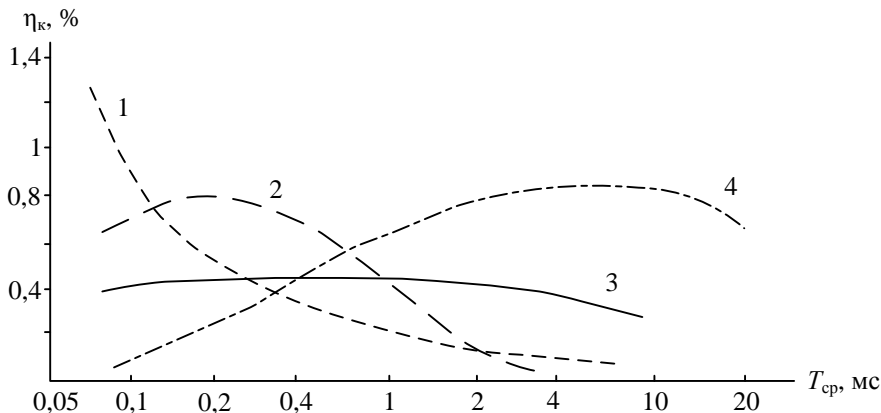


Рис. 4.39. Графики зависимости $\Delta\eta_k$ от $T_{ср}$ над различными горными породами (по А. П. Карасеву и др.):
 1 – над пиритизированными эффузивами; 2 – над метасоматитами с вкрапленным полиметаллическим оруденением; 3 – над полиметаллическим рудным телом; 4 – над графитизированными породами

Первая группа характеризуется высокими значениями S_k , равными $4-5 мс^{-1}$, и малыми T_m , обычно меньшими $0,05 мс$. Такие параметры характерны для пиритизированных вмещающих пород.

Для второй группы характерны значения $S_k=2,5-3,5 мс^{-1}$ и T_m от нескольких долей до первых единиц миллисекунд. Такие

значения временных параметров наблюдаются над объектами, содержащими продуктивную минерализацию – галенит, халькопирит, арсенопирит, пирит рудной генерации и т. п.

К третьей группе относятся графитизированные породы. У них S_k меньше 2мс^{-1} , а T_m достигает 10мс и более.

Кроме поляризационных параметров при интерпретации результатов РСВП, как и при изучении ВП в поздней стадии, используются графики ρ_k .

На рис. 4.40 приведен пример результатов РСВП на Ново-Широкинском полиметаллическом месторождении. Рудные тела, сложенные пиритом, галенитом, сфалеритом и халькопиритом залегают в вулканогенно-осадочной толще. Породы, непосредственно вмещающие рудные тела, интенсивно изменены гидротермальными процессами и содержат неравномерную вкрапленность пирита. Пиритизированы и породы за пределами месторождения.

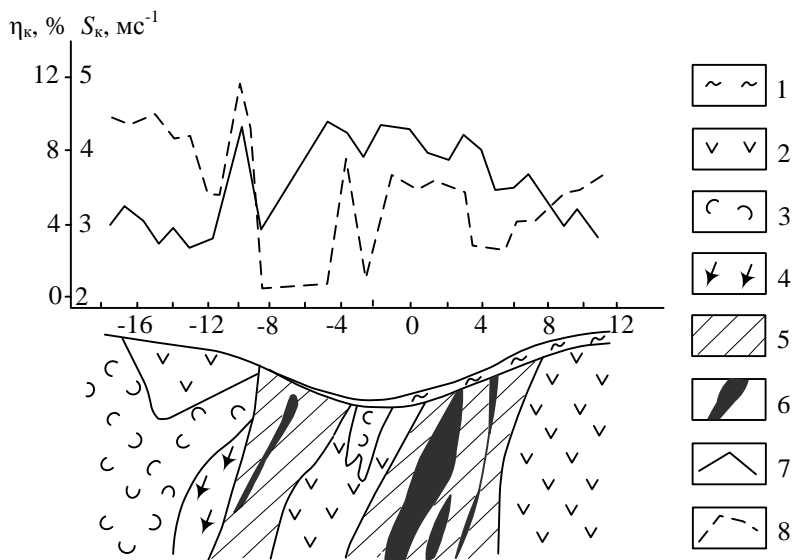


Рис. 4.40. Результаты РСВП на Ново-Широкинском месторождении (по А. П. Карасеву и др):

1 – рыхлые отложения; 2 – андезитовые порфириды; 3 – лавобрекчии; 4 – андезитовые порфиры; 5 – метасоматически измененные пиритизированные породы; 6 – рудные тела с высоким содержанием свинца; 7 – график η_k ; 8 – график S_k

По методу вызванной поляризации в поздней стадии получены широкие аномалии, фиксирующие рудные тела и пиритизированные вмещающие породы. По данным РСВП высокими значениями η_k отмечаются гидротермально измененные породы, включающие рудные тела и вкрапленность сульфидов. Над рудными телами наблюдаются локальные понижения S_k до 2 мс^{-1} на пикетах от -5 до -9 и до $2,6 \text{ мс}^{-1}$ на пикетах от 3 до 5. Над вмещающими породами значения S_k увеличиваются до $4-5 \text{ мс}^{-1}$.

4.13. Контактный способ поляризационных кривых (КСПК)

Принцип и физико-химические основы метода. КСПК заключается в изучении электрохимических процессов, происходящих на границе заряженного электропроводящего объекта с вмещающей ионопроводящей средой под действием электрического тока. Изучается зависимость между силой тока, стекающего с объекта и разностью потенциалов между объектом и вмещающей средой. Результаты изучения этой зависимости содержат информацию о минералогическом составе рудного тела и позволяют оценить его размеры.

Если электропроводящий объект находится в электролите, на его поверхности образуется двойной электрический слой. Поэтому объект по отношению к электролиту обладает электродным потенциалом φ . Между обкладками двойного слоя происходит обмен зарядами, но в нормальных условиях количество зарядов, пересекающих границу в противоположных направлениях, одинаково и система находится в состоянии равновесия. В таком состоянии для различных минералов электродный потенциал составляет от $-0,2$ до $+0,2$ В. В зависимости от условий величина электродного потенциала несколько меняется, оставаясь в указанных пределах. По величине электродного потенциала минералы можно расположить в ряд (аналогично ряду напряжений металлов).

Если к электропроводящему минералу подсоединить полюс источника тока, через границу потечет вынужденный ток,

который нарушит равновесие между окислительными и восстановительными процессами. При подключении от источника к отрицательному полюсу поток электронов направлен к минералу. Это приводит к усилению восстановительных (катодных) процессов. Если к минералу подключен положительный полюс источника тока, поток электронов направлен от минерала. В этом случае усиливаются окислительные (анодные) процессы.

В электрохимической реакции участвуют не все заряды, имеющиеся на поверхности объекта, а только обладающие достаточной энергией. При увеличении приложенного напряжения происходит перестройка двойного слоя и изменяется величина электродного потенциала при слабом росте тока. По мере протекания тока участвующие в реакции компоненты расходуются и превращаются в продукты реакции. Постепенно все они окажутся израсходованными. У границы фаз скапливаются заряды, вследствие чего возрастает контактная разность потенциалов. Ток при этом меняется мало.

При дальнейшем увеличении подводимого напряжения приобретает достаточную энергию и вступает в реакцию следующий компонент. Это вызывает рост тока при мало меняющемся электродном потенциале. Ток растет, пока не израсходуется второй компонент, после чего снова растет контактная разность потенциалов при мало меняющемся токе. Так продолжается до тех пор, пока не израсходуются все способные на реакцию компоненты. Поэтому поляризационная кривая, представляющая собой график зависимости тока I от электродного потенциала φ , имеет ступенчатый вид (рис. 4.41).

Продолжения вертикальных отрезков поляризационной кривой отсекают на оси φ значения потенциала, соответствующие определенным реакциям и отражающие химический состав минерала. Продолжения горизонтальных отрезков отмечают на оси I значения тока, при которых происходит переход от одной реакции к другой. Разность уровней соседних горизонтальных отрезков называется предельной силой тока реакции. Она зависит от количества участвующего в реакции вещества.

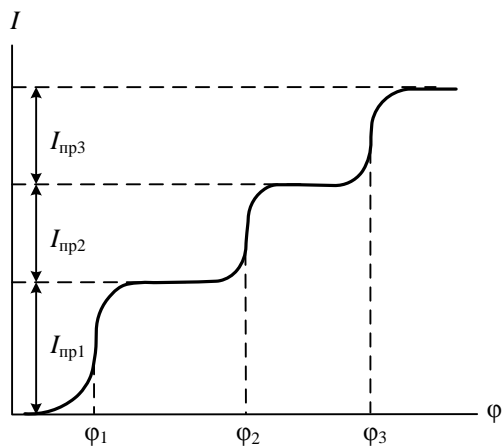


Рис. 4.41. Вид поляризационной кривой

Различные минералы имеют разные потенциалы реакций. Это является предпосылкой для определения минерального состава объекта по поляризационной кривой.

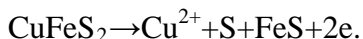
Потенциалы реакций для некоторых наиболее распространенных электропроводящих минералов приведены в табл. 4.1

Потенциалы реакций для электропроводящих минералов

Таблица 4.1

Минералы	Анодные процессы		Катодные процессы	
	1-й	2-й	1-й	2-й
Пирротин	+ 0,60	+ 0,90	- 0,80	- 1,50
Пирит	+ 0,60	-	- 0,50	- 1,30
Халькопирит	+ 0,20	+ 0,70	- 0,60	- 1,40
Пентландит	+ 0,40	-	- 0,35	- 1,10
Графит	+ 1,50	-	- 1,55	-

То, что одному минералу соответствует больше одной ступени на поляризационной кривой (не одно значение потенциала реакций), объясняется многостадийностью электрохимических реакций. Например, на халькопирите анодные процессы можно представить следующим образом:



Для этой реакции $\varphi=+0,2$ В.

При дальнейшем повышении подводимого напряжения кроме ионов меди начинают выделяться ионы трехвалентного железа, ионы водорода и ионы SO_4 :



Потенциал второй реакции $+0,7$ В. Предельная сила тока реакции зависит от многих факторов: геометрии реагирующей поверхности, концентрации реагирующих веществ в твердой и жидкой фазе, пористости и влажности вмещающих пород и т. п. Эта величина также существенно зависит от скорости съемки поляризационной кривой, т. е. от скорости изменения силы тока. Для устранения влияния последнего фактора результаты наблюдений приводятся к стандартным условиям по приближенной формуле:

$$I_{\text{пред.ст.}} = I_{\text{пред.набл.}} \sqrt[3]{\frac{15}{\left(\frac{dI}{dt}\right)}}. \quad (4.34)$$

В этой формуле 15 – стандартная скорость изменения тока, принятая равной 15 ма/с. Формула построена на основании экспериментально установленной приблизительной пропорциональности $I_{\text{пред.}}$ кубическому корню из скорости изменения тока.

Измерение контактной разности потенциалов. При измерении контактной разности потенциалов питающий электрод *A* и приемный электрод *M* помещаются непосредственно в рудном теле. Так как хорошо проводящее рудное тело является практически эквипотенциальным проводником, нет необходимости в двух электродах. Роль электродов *A* и *M* может выполнять один электрод. Электроды *B* и *N* могут располагаться в любой точке вмещающей среды (рис. 4.42).

Заряд, выполняющий роль электродов *A* и *M*, изготавливается в виде резиновой камеры, на которой закреплены контактные пружины из нержавеющей стали. После установки прибора на нужной глубине в камеру закачивается масло. При этом пружины прижимаются к стенкам скважины, обеспечивая

хороший контакт с рудным телом. Для заземления N используется неполяризующийся каломелевый электрод.

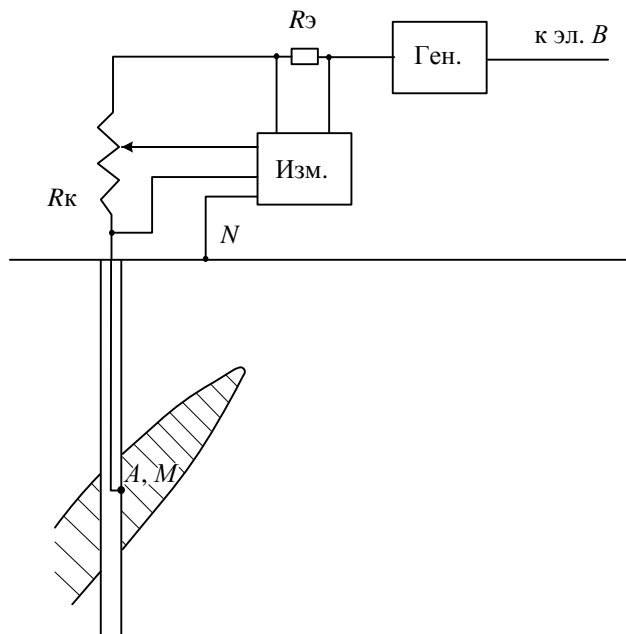


Рис. 4.42. Принцип КСПК и структурная схема аппаратуры

Измеряемая разность потенциалов состоит из двух частей: контактной разности потенциалов φ и омического падения напряжения на участке между приемными электродами $\Delta U_{\text{лин}}$. По величине линейная разность потенциалов обычно значительно превышает φ , но ее характерной особенностью является пропорциональность силе тока. В отличие от нее контактная разность потенциалов нелинейна. Это различие позволяет разделить φ и $\Delta U_{\text{лин}}$. Разделение осуществляется путем компенсации линейной части измеряемой ΔU .

Компенсирующее напряжение U_k снимается с активного сопротивления R_k , включенного последовательно в токовую цепь (см. рис. 4.42). В измерителе ΔU и U_k суммируются (по-

лярность U_k подбирается противоположной $\Delta U_{\text{лин}}$) и измеряется их разность:

$$\Delta U_{\text{изм}} = \varphi + \Delta U_{\text{лин}} - U_k. \quad (4.35)$$

Так как величина $\Delta U_{\text{лин}}$ неизвестна, производят регистрацию поляризационных кривых при нескольких значениях U_k . При недокомпенсации поляризационные кривые выполаживаются, при перекомпенсации становятся круче, а при больших токах даже загибаются влево (рис. 4.43).

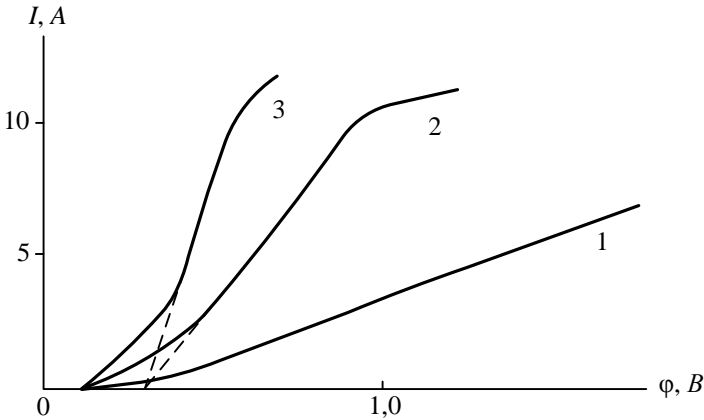


Рис. 4.43. Поляризационные кривые с разной степенью компенсации линейной ΔU (по Ю. С. Рыссу):

1 – недокомпенсация; 2 – близкая к нормальной кривая; 3 – небольшая перекомпенсация

При измерениях изучают как анодные, так и катодные процессы, т. е. снимают поляризационные кривые при разной полярности питающего электрода в рудном теле. Между измерениями двух поляризационных кривых должна быть пауза, достаточная для деполяризации среды. Для ускорения процесса деполяризации пропускают ток противоположного направления.

Структурная схема установки для КСПК приведена на рис. 4.42.

Принципы интерпретации результатов КСПК. Одной из главных задач интерпретации поляризационных кривых является определение минерального состава рудного тела, в которое сделано заземление. Наличие различных минералов устанавливается по потенциалам реакций. Для уверенной интерпретации надо знать, какие минералы могут быть в данных геологических условиях, так как потенциалы реакций для некоторых минералов близки между собой.

Реальные поляризационные кривые отличаются от теоретических кривых: вместо горизонтальных и вертикальных участков наблюдаются наклонные, более или менее линейные, отрезки. Это связано с влиянием многих факторов. Например, реакция на последующем минерале может начаться, когда еще не закончилась реакция на предыдущем минерале, на измеряемый потенциал накладываются потенциалы реакций на соседних объектах и т. д. Установить, действительно ли наблюдается тот или иной потенциал реакции, помогает совместный анализ поляризационных кривых, снятых при различной степени компенсации. При различной степени компенсации наклон кривых разный, но соответствующие одной и той же реакции крутые прямолинейные участки кривых при их продолжении отсекают на оси абсцисс близкие значения ϕ (см. рис. 4.43).

Для примера рассмотрим поляризационные кривые, полученные при заземлениях в двух рудных подсечениях на медно-никелевом месторождении. Составляющий основную массу рудных тел пирротин интереса не представляет. Полезными компонентами являются пентландит и халькопирит, содержащие никель и медь.

На первом подсечении при изучении катодных реакций получены два значения ϕ , равные $-0,5$ В и $-1,5$ В (рис. 4.44, *a*). Это позволяет говорить о том, что рудное тело сложено пирротинном и пиритом, и интереса не представляет (см. табл. 4.1).

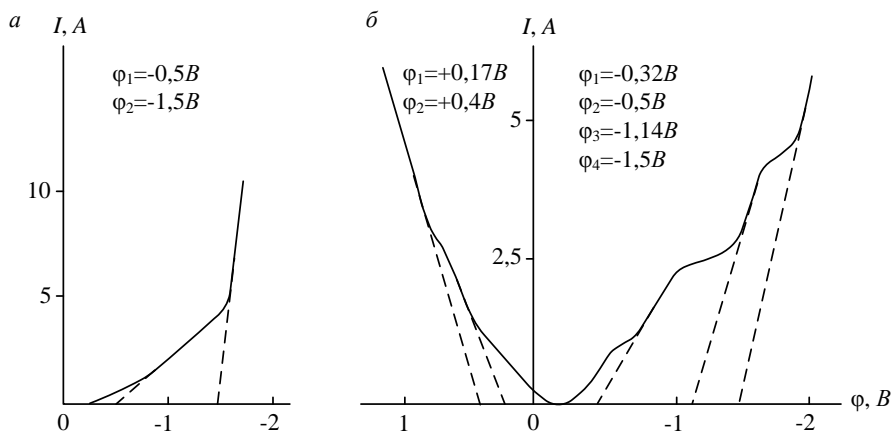


Рис. 4.44. Поляризационные кривые, снятые на медно-никелевом месторождении (по Ю. С. Рыссу): *а* – заземление в пирротиновой линзе; *б* – заземление в продуктивном рудном теле с пирротинном и халькопиритом

На другом рудном подсечении кроме тех же потенциалов $-0,5$ В и $-1,5$ В на катодной кривой выделяются потенциалы реакций $-0,32$ В и $-1,14$ В, соответствующие пентландиту (см. рис. 4.44, *б*). Не исключено, что в рудах присутствует халькопирит, так как его потенциалы катодных реакций близки к пирротину. Действительно, при изучении анодного процесса получены потенциалы реакций $+0,17$ В и $+0,4$ В. Первая из этих реакций характерна для халькопирита, вторая – для пентландита.

Вторая задача, которая может решаться методом КСПК – оценка масштаба оруденения. Эта задача имеет важное значение при оценке рудопроявлений и на первых стадиях разведки месторождений. Принципиальная возможность ее решения обосновывается тем, что величина предельного тока определяется предельной плотностью тока на поверхности минерала, которая является характеристикой этого минерала. Поэтому поверхность данного минерала

$$S = I_{\text{пред}} / j_{\text{пред}}$$

Таким образом, коэффициентом пропорциональности между поверхностью реагирующего минерала и его $I_{\text{пред}}$ является величина, обратная плотности тока,

$$K=1/j_{\text{пред}}.$$

Рудное тело обычно сложено несколькими минералами. Если содержание исследуемого минерала равно $c < 1$, поверхность рудного тела может быть вычислена по формуле:

$$S = \frac{KI_{\text{пред}}}{c}. \quad (4.36)$$

Определив поверхность и зная форму рудного тела, можно найти его объем, а зная содержание полезного компонента, оценить его запасы. Надежность такой оценки зависит от точности определения коэффициента K и содержания полезного компонента в руде.

Кроме названных выше задач по результатам КСПК можно определять, принадлежат рудные подсечения одному объекту или соответствуют разным рудным телам. Для этого снимают поляризационные кривые при заземлениях в разных рудных подсечениях. Если поляризационные кривые одинаковые, можно полагать, что они сняты при заземлениях в одно рудное тело. Различие поляризационных кривых однозначно указывает на то, что заземления располагались в разных рудных телах.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

5.1. Анизотропия горных пород и ее геологическая природа

Многие горные породы обладают анизотропией электромагнитных свойств – удельного сопротивления, поляризуемости, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости. Наиболее простой моделью анизотропной горной породы является слоистая среда. Если горная порода сложена перемежающимися прослойками, имеющими разные электромагнитные свойства, соответствующий параметр имеет различные значения по направлению слоистости и вкрест этого направления (рис. 5.1, *а*). Значение параметра по направлению слоистости называется продольным. Его обозначают индексом *t* или *l* (ρ_t , η_t , ε_t , μ_t или ρ_l , η_l , ε_l , μ_l). Значение параметра по направлению вкрест слоистости называется поперечным и обозначается индексом *n* (ρ_n , η_n , ε_n , μ_n). По другим направлениям параметры имеют промежуточные между продольными и поперечными значения. Электрические параметры анизотропных пород в математическом отношении представляют собой тензорные величины. Продольные и поперечные параметры являются главными значениями тензоров.

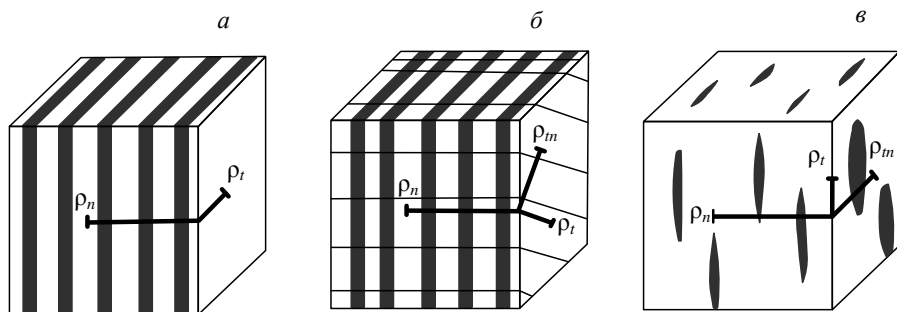


Рис. 5.1. Типы структур анизотропных пород:

а – слоистая одноосная анизотропная порода; *б* – слоистая с секущими трещинами трехосная анизотропная порода; *в* – трехосная анизотропная порода с включениями

Аналогичный характер имеют параметры трещиноватых горных пород, если трещины имеют одинаковую ориентировку. Такая картина может наблюдаться, например, в тектонических зонах или в различных сланцах. Зоны рассланцевания характерны для многих рудных месторождений. Анизотропия рассланцованных горных пород часто вызывается совместным влиянием упорядоченной трещиноватости и перемежаемости тонких прослоек, обладающих различными свойствами. Например, вмещающие уральские колчеданные месторождения кварцевохлоритосерицитовые сланцы состоят из перемежающихся прослоек пористого хлоритосерицитового и плотного сильно окварцованного материала. Кроме того, порода пронизана параллельными этим прослойкам тонкими трещинками. Поэтому сланцы обладают высокой анизотропией удельного сопротивления, а если в них есть вкрапленность сульфидов, неравномерно распределенная между компонентами, то и анизотропией поляризуемости.

Рассмотренная слоистая модель является примером одноосной анизотропной среды. В ней есть лишь одно особое направление – по нормали к слоистости. В плоскости слоистости по всем направлениям свойства одинаковы. Это частный случай.

Общий случай – это трехосная анизотропная среда, имеющая три характерных значения физического параметра. Соответственно описывающий его тензор имеет три главных значения. Представим себе, что слоистая порода пересечена системой параллельных трещин, пересекающих слоистость (см. рис. 5.1, б). В этом случае в плоскости слоистости значения параметра по разным направлениям неодинаковы. Минимальное и максимальное значения параметра наблюдаются по направлению трещин и по нормали к ним. Третье главное значение параметра, как и в случае одноосной среды, наблюдается по нормали к слоистости и также называется поперечным. Продольным значением параметра в трехосной среде является его величина в плоскости слоистости по направлению трещин. Значение параметра в плоскости слоистости по нормали к трещинам будем

обозначать индексами tn ($\rho_m, \eta_m, \varepsilon_m, \mu_m$). Это промежуточное главное значение, величина которого всегда между продольным и поперечным значениями параметра.

Для удельного сопротивления горной породы всегда выполняется соотношение $\rho_t \leq \rho_m \leq \rho_n$. Всегда одинаково и соотношение между главными значениями диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости: $\varepsilon_t \geq \varepsilon_m \geq \varepsilon_n, \mu_t \geq \mu_m \geq \mu_n$. Для поляризуемости соотношение между продольным и поперечным значениями может быть любым.

Для характеристики удельного сопротивления анизотропной среды кроме трех главных значений часто используется среднее геометрическое значение

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} . \quad (5.1)$$

Для характеристики степени различия удельного сопротивления по разным направлениям используется коэффициент анизотропии

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t} . \quad (5.2)$$

Можно также записать для коэффициента анизотропии формулы $\lambda = \rho_n / \rho_m = \rho_m / \rho_t$.

Если среда трехосная, для ее характеристики введем еще коэффициент анизотропии в плоскости слоистости:

$$\lambda_t = \sqrt{\rho_m / \rho_t} , \quad (5.3)$$

очевидно, всегда $\lambda \geq \lambda_t$.

Аналогичными коэффициентами определяется анизотропия диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости:

$$\lambda_\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_t / \varepsilon_n} , \quad (5.4)$$

$$\lambda_\mu = \sqrt{\mu_t / \mu_n} . \quad (5.5)$$

В последних двух соотношениях числитель и знаменатель по сравнению с формулой (5.2) поменялись местами, чтобы коэффициенты анизотропии для диэлектрической и магнитной проницаемости, как и для удельного сопротивления, всегда были не меньше единицы.

Для характеристики анизотропии поляризуемости можно

использовать аналогичный коэффициент:

$$\lambda_{\eta} = \sqrt{\eta_n / \eta_t} . \quad (5.6)$$

В отличие от других параметров соотношение между продольной и поперечной поляризуемостью может быть любым. Поэтому коэффициент анизотропии может быть как больше, так и меньше единицы. Это не удобно, так как при одной и той же разнице поляризуемостей модуль коэффициента анизотропии имеет разную величину. Более удобно характеризовать анизотропию поляризуемости коэффициентом

$$\Lambda_{\eta} = \frac{\eta_t - \eta_n}{\eta_t + \eta_n} . \quad (5.7)$$

Этот коэффициент при разном соотношении η_t и η_n имеет разный знак, но его модуль при одинаковой разнице поляризуемостей имеет одну и ту же величину.

Слоистость и трещиноватость не единственные причины анизотропии электромагнитных свойств. К таким же результатам приводит наличие в горной породе неизометричных однообразно ориентированных включений, отличающихся по своим свойствам от вмещающей среды (см. рис. 5.1, в). Теория таких сред разработана для ρ , ε и μ [20]. Используя алгоритм Сигела-Комарова ее несложно распространить и на анизотропию поляризуемости.

Рассмотрим удельное сопротивление среды, содержащей эллипсоидальные включения с полуосями $a > b > c$. Удельные сопротивления среды и включений ρ_1 и ρ_2 соответственно. Ориентировка осей включений одинаковая. Эффективное удельное сопротивление по направлению i -й оси определяется выражением [20]:

$$\rho_i = \frac{\rho_1}{1 + \frac{2\nu(\rho_1 - \rho_2)}{(1 - \nu)(\rho_1 - \rho_2)l_i + 2\rho_2}} , \quad (5.8)$$

где ν – доля включений в общем объеме породы; l_i – коэффициент деполаризации, зависящий от соотношения полуосей a , b и c (аналог коэффициента размагничивания).

Сумма коэффициентов деполаризации $l_a+l_b+l_c=2$. Для включений в виде тонких дисков ($c \ll a, c \ll b$) $l_a \approx l_b \rightarrow 0, l_c \approx 2$. Для игольчатых включений ($a \gg b, a \gg c$) $l_a \rightarrow 0, l_b \approx l_c \approx 1$. При сферической форме включений, когда $l_a=l_b=l_c$, среда становится изотропной.

Коэффициенты деполаризации вычисляются через эллиптические интегралы. Для облегчения их определения С. С. Сысковым рассчитана номограмма (рис. 5.2). По номограмме определяются два коэффициента. Третий коэффициент находится как дополнение суммы двух найденных до 2.

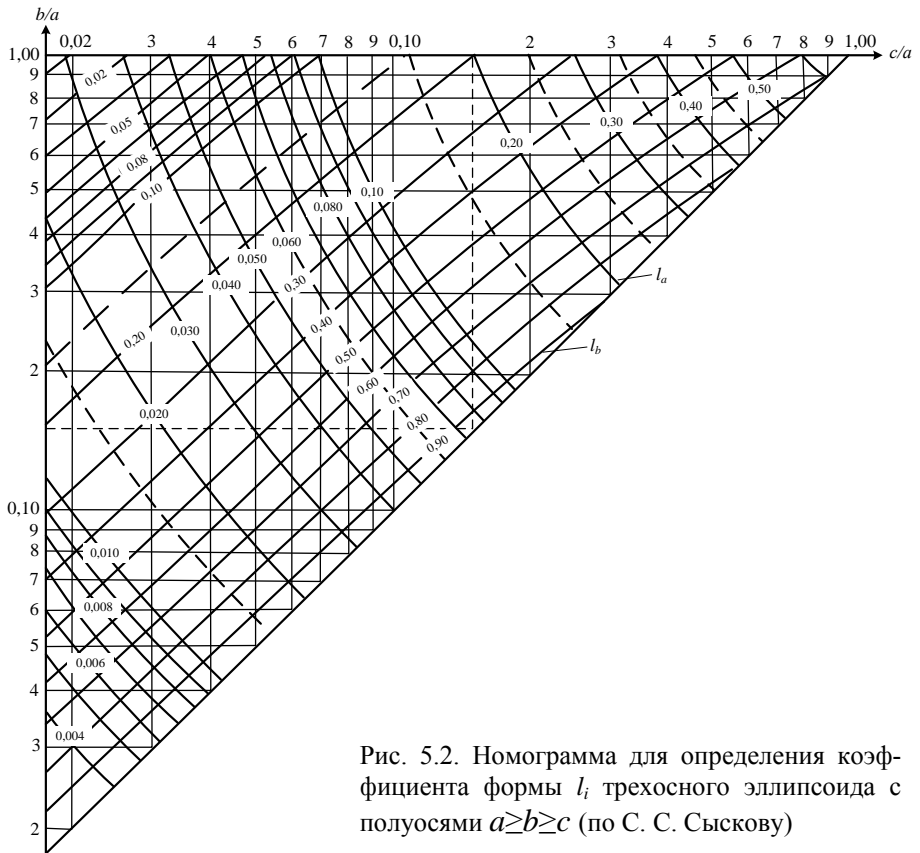


Рис. 5.2. Номограмма для определения коэффициента формы l_i трехосного эллипсоида с полуосями $a \geq b \geq c$ (по С. С. Сыскову)

Для определения поляризуемости среды с эллиптическими включениями можно воспользоваться алгоритмом Сигела-Комарова:

$$\eta_i = 1 - \frac{\rho_i}{\rho_i^*}. \quad (5.9)$$

Эффективное удельное сопротивление ρ_i^* рассчитывается по той же формуле путем подстановки вместо истинных удельных сопротивлений ρ_1 и ρ_2 их эффективных значений $\rho_1^* = \rho_1 / (1 - \eta_1)$ и $\rho_2^* = \rho_2 / (1 - \eta_2)$.

В случае среды с включениями будем называть продольными значения параметров по направлению большей оси включений, поперечными – значения параметров по направлению наименьшей оси. По аналогии со слоистой средой коэффициент анизотропии $\lambda_{\eta_t} = \sqrt{\lambda_{\eta_n} / \lambda_t}$ (или Λ_{η_t}) условно будем называть тоже коэффициентом анизотропии в плоскости слоистости.

Из природы анизотропии электромагнитных свойств горных пород вытекают принципиальные возможности ее использования для решения геологических задач. Очевидна возможность использования анизотропии для картирования анизотропных горных пород и зон трещиноватости, в том числе и не дифференцированных по электромагнитным параметрам. При этом возможно не только установление местоположения этих образований, но и изучение их элементов залегания и структурных особенностей, как в плане, так и в объеме.

Как показывают оценки, наличие в горной породе двух систем трещин может привести к появлению анизотропии удельного сопротивления в плоскости слоистости с λ_t максимум до 1,2-1,3. Значительно более высокие значения λ_t могут наблюдаться при появлении неизометричных скоплений рудной вкрапленности. Поэтому при определенных условиях изучение этого параметра может дать дополнительный критерий при оценке рудоперспективности участков. Изучение ориентировки осей тензора удельного сопротивления в пространстве может

быть использовано для исследования элементов структуры рудного поля.

Изучение анизотропии поляризуемости позволяет получить информацию о распределении поляризующегося материала между компонентами породы. Принципиально возможна также оценка содержания поляризующегося материала в блоках горных пород. Эти и другие возможности могут быть использованы при классификации аномалий, оценке перспективности площадей и решении других поисково-разведочных задач.

5.2. Решение задачи об электрическом поле точечного источника в анизотропной среде

Электрическое поле в анизотропной по удельному сопротивлению среде описывается уравнением Кирхгофа, которое в прямоугольной системе координат имеет вид:

$$\operatorname{div} \vec{j} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0. \quad (5.10)$$

Ориентируем оси x , y и z по направлениям главных осей тензора удельного сопротивления ρ_t , ρ_m и ρ_n соответственно, источник, с которого стекает ток силой I , поместим в начале координат. Тогда, используя закон Ома, можно записать уравнение (5.10) в виде:

$$\frac{1}{\rho_t} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho_n} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (5.11)$$

Введя новую систему координат:

$$\begin{cases} \bar{x} = x\sqrt{\rho_t} \\ \bar{y} = y\sqrt{\rho_m} \\ \bar{z} = z\sqrt{\rho_n} \end{cases}, \quad (5.12)$$

приведем это выражение к уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial \bar{z}^2} = 0. \quad (5.13)$$

Решив уравнение, получим выражение потенциала:

$$U = \frac{C}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2}} = \frac{C}{\sqrt{\rho_t x^2 + \rho_m y^2 + \rho_n z^2}}. \quad (5.14)$$

Для нахождения постоянной интегрирования C можно воспользоваться очевидным соотношением:

$$I = \int_s j_n dS, \quad (5.15)$$

где S – замкнутая поверхность, охватывающая источник; j_n – нормальная к этой поверхности компонента плотности тока.

Компоненты плотности тока по осям координат

$$\left\{ \begin{array}{l} j_x = -\frac{1}{\rho_t} \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{Cx}{\left(\rho_t x^2 + \rho_m y^2 + \rho_n z^2\right)^{3/2}} \\ j_y = -\frac{1}{\rho_m} \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{Cy}{\left(\rho_t x^2 + \rho_m y^2 + \rho_n z^2\right)^{3/2}} \\ j_z = -\frac{1}{\rho_n} \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{Cz}{\left(\rho_t x^2 + \rho_m y^2 + \rho_n z^2\right)^{3/2}}, \end{array} \right. \quad (5.16)$$

таким образом,

$$j_x/x = j_y/y = j_z/z. \quad (5.17)$$

Это равенство является условием радиальности вектора. Следовательно, токовые линии в анизотропной среде представляют собой радиальные прямые, расходящиеся из источника.

Если в качестве замкнутой поверхности S взять сферу с центром в точке расположения источника тока, нормальная компонента равна полной плотности тока и уравнение (5.15) принимает вид:

$$I = \int_s \sqrt{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2} dS.$$

Решив это уравнение (интегрирование следует выполнять в сферической системе координат), найдем:

$$C = \frac{I \sqrt{\rho_t \rho_m \rho_n}}{4\pi}. \quad (5.18)$$

Подставив значение C в выражение (5.14), найдем:

$$U = \frac{I \sqrt{\rho_t \rho_m \rho_n}}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{\rho_t x^2 + \rho_m y^2 + \rho_n z^2}}. \quad (5.19)$$

Распределение потенциала точечного источника в трехосной анизотропной среде описывается этим уравнением.

5.3. Особенности электрического поля в анизотропной среде

Вынесем в знаменателе уравнения (5.19) удельное сопротивление ρ_t из под знака корня. После этого выражение потенциала принимает вид:

$$U = \frac{I \rho_m \lambda_t}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + \lambda_t^2 y^2 + \lambda^2 z^2}}. \quad (5.20)$$

Сравнивая это выражение с уравнением потенциала в изотропной среде

$$U|_{\lambda=1} = \frac{I \rho}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad (5.21)$$

можно видеть, что особенностью электрического поля в анизотропной среде является разная скорость его затухания по разным направлениям. По направлению вкrest слоистости потенциал затухает так, как будто расстояния увеличены в λ раз. Ослабление поля при удалении от источника по направлению ρ_m происходит так, как будто расстояния увеличены в λ_t раз. По направлению ρ_t поле затухает по тому же закону, что и в анизотропных породах. При этом величина потенциала такая же, как при удельном сопротивлении изотропной среды равном $\rho_m \lambda_t$.

Таким образом, изменив в λ и λ_t раз масштабы по направлениям осей ρ_n и ρ_m тензора удельного сопротивления, можно перейти к эквивалентной изотропной среде. Удельное сопротивление такой среды $\rho_{\text{экр}} = \rho_m \lambda_t$.

Приравняв выражение потенциала постоянной величине U_{const} , получим уравнение эквипотенциальной поверхности с равной этой величине отметкой:

$$\frac{I \rho_m \lambda_t}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + \lambda_t^2 y^2 + \lambda^2 z^2}} = U_{\text{const}}.$$

Приведем это уравнение к более удобному и простому виду:

$$x^2 + \lambda_t^2 y^2 + \lambda^2 z^2 = \left(\frac{I \rho_m \lambda_t}{4\pi U_{\text{const}}} \right)^2 = a^2.$$

Из последнего выражения получим:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{a}{\lambda_t}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{a}{\lambda}\right)^2} = 1. \quad (5.22)$$

Таким образом, эквипотенциальные поверхности в поле точечного источника в анизотропной среде имеют форму подобных эллипсоидов, оси которых ориентированы по направлениям главных осей тензора удельного сопротивления, а центры совпадают с источником поля. Отношение полуосей эллипсоидов

$$a:b:c = 1:1/\lambda_t:1/\lambda. \quad (5.23)$$

Линии равного потенциала в любой плоскости имеют форму подобных эллипсов с общим центром. Отношение осей изолиний зависит от ориентировки плоскости относительно главных осей тензора удельного сопротивления. В частном случае изолинии могут быть и окружностями.

Особенностью электрического поля в анизотропной среде является несовпадение токовых и силовых линий. Силовые линии ортогональны к эллипсоидальным эквипотенциальным поверхностям и, следовательно, криволинейны. Токовые линии, как было показано выше, – расходящиеся из источника прямые (рис. 5.3).

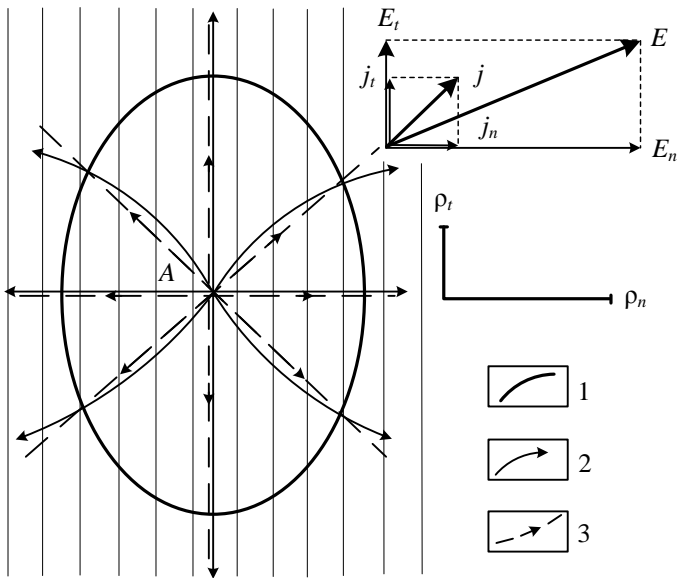


Рис. 5.3. Электрическое поле точечного источника в анизотропной среде ($\lambda=1,5$):
 1 – изолиния потенциала; 2 – силовые линии; 3 – токовые линии

Эта особенность вытекает из закона Ома. Операции над компонентами, ориентированными по главным осям тензора удельного сопротивления, выполняются по правилам обычной алгебры и для компонент напряженности поля и плотности тока можно записать соотношения:

$$E_t = \rho_t \cdot j_t;$$

$$E_n = \rho_n \cdot j_n,$$

так как $\rho_n > \rho_t$, то

$$\frac{E_n}{E_t} > \frac{j_n}{j_t},$$

поэтому вектор напряженности поля отклоняется от вектора плотности тока в сторону нормали к слоистости (см. рис. 5.3).

Используя понятие об эквивалентной изотропной среде, можно, зная поле в изотропной среде, получить его распределение в среде анизотропной. В качестве примера построим по

графику потенциала в изотропной среде с удельным сопротивлением $\rho_{\text{эКВ}} = \rho_m \lambda_t$ график потенциала в анизотропной среде по направлению вкрест слоистости. Выберем на оси графика потенциала в эквивалентной изотропной среде произвольные точки M'_1, M'_2, M'_3 (рис. 5.4). При построении этого графика расстояния по профилю были увеличены в λ раз по сравнению с истинными. Поэтому переместим их так, чтобы расстояния до них от проекции источника на линию профиля стало в λ раз меньше (точки M_1, M_2, M_3). Перенеся в эти точки значения потенциала с соответствующих точек графика для эквивалентной изотропной среды, получим график потенциала в анизотропной среде (см. рис. 5.4). Эти деформированные расстояния в эквивалентной среде будем называть кажущимися и пометать индексом "к".

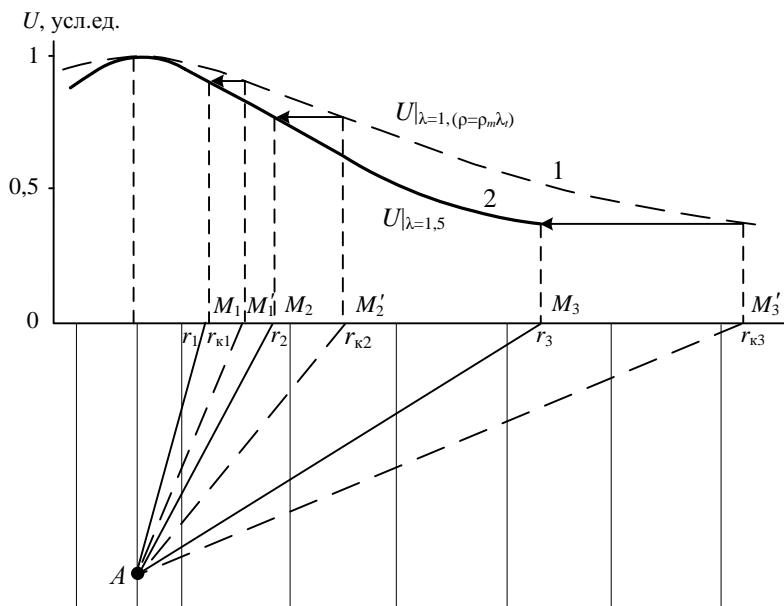


Рис. 5.4. Пример построения графика потенциала в анизотропной среде по графику в анизотропной среде:

1- график потенциала в эквивалентной изотропной среде, 2 – то же в реальной анизотропной среде. Профиль ориентирован нормально к слоистости; $\lambda=1,5$

Аналогичным образом можно построить график потенциала в анизотропной среде по любому направлению. При произвольной ориентировке профиля расстояния в эквивалентной среде изменяются по направлениям главных осей тензора удельного сопротивления – в λ_n раз по оси ρ_n и в λ_t раз по оси ρ_m . Поэтому при графическом способе нахождения вида поля в анизотропной среде приходится выполнять несколько более сложные геометрические построения. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в дальнейшем.

5.4. Выражение потенциала в системе координат с осями x и y , ориентированными горизонтально

Пусть угол падения слоистости α , а угол наклона трещин в плоскости слоистости β . Оси координат системы x_1, y_1, z_1 , в которой были записаны предыдущие уравнения, ориентированы по направлению главных осей тензора удельного сопротивления. Так как ориентировка главных осей тензора удельного сопротивления в пространстве может быть любой, для практических целей удобнее пользоваться системой координат, в которой две оси лежат в горизонтальной плоскости, а третья ось ориентирована вертикально вниз.

Повернем систему координат вокруг оси z_1 на угол β . При этом ось x_1 станет горизонтальной, перейдя в ось x , а ось y ориентируется по падению слоистости (рис. 5.5). Теперь повернем систему координат вокруг оси x на угол α , чтобы ось z_1 стала вертикальной, перейдя в ось z . В новой системе координат x, y, z ось x ориентирована горизонтально в сторону скатывания, ось y – горизонтально вкrest простираения слоистости в направлении падения, ось z – вертикально вниз.

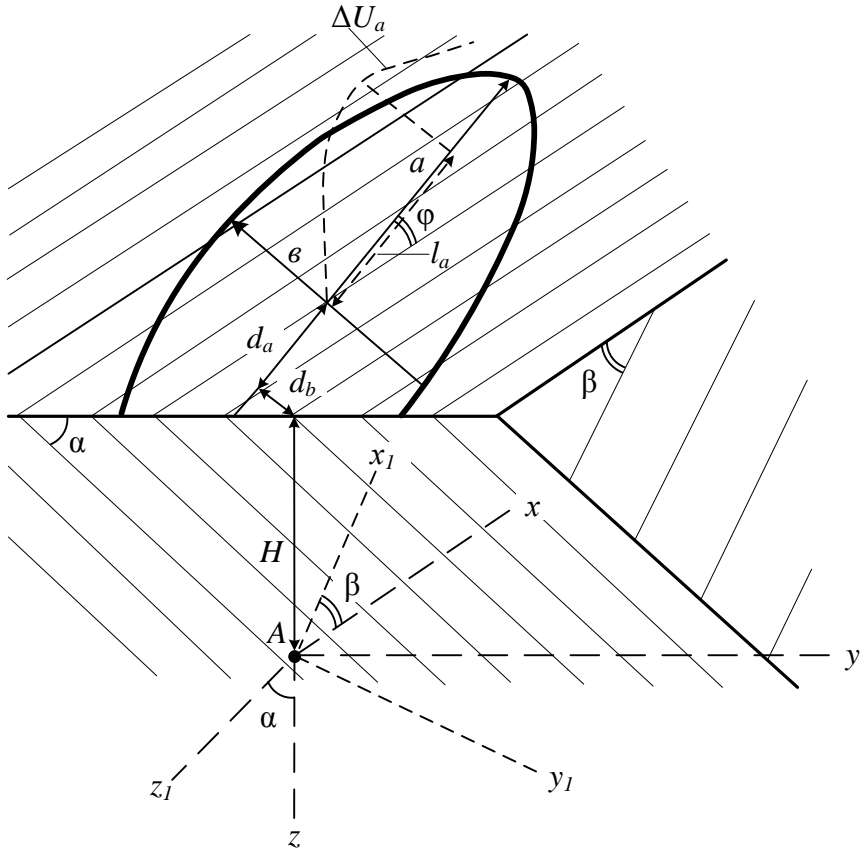


Рис. 5.5. Переход к системе координат с горизонтальными осями x и y . Поле точечного источника на поверхности трехосной анизотропной среды

Выполнив по известным правилам математики преобразование координат в уравнении (5.20), получим выражение потенциала в новой координатной системе:

$$U = \frac{I\rho_m \lambda_t}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{Ax^2 + By^2 + Cz^2 - 2Dxy - 2Exz - 2Fyz}}. \quad (5.24)$$

Коэффициенты у координат зависят от параметров анизотропной среды – коэффициентов анизотропии λ и λ_t и углов падения и скатывания α и β :

$$\begin{aligned}
 A &= 1 + \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \sin^2 \beta; \\
 B &= \left[1 + \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \cos^2 \beta \right] \cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha; \\
 C &= \left[1 + \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \cos^2 \beta \right] \sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha; \\
 D &= \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \cos \alpha \sin \beta \cos \beta; \\
 E &= \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \sin \alpha \sin \beta \cos \beta; \\
 F &= \left\{ \lambda^2 - \left[1 + \left(\lambda_t^2 - 1 \right) \cos^2 \beta \right] \right\} \sin \alpha \cos \alpha.
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

В одноосной среде $\lambda_t=1$ и $A=1, D=E=0$. Для остальных коэффициентов выражения упрощаются:

$$\begin{aligned}
 B &= \cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha = 1 + \left(\lambda^2 - 1 \right) \sin^2 \alpha = m; \\
 C &= \sin^2 \alpha + \lambda^2 \cos^2 \alpha = 1 + \left(\lambda^2 - 1 \right) \cos^2 \alpha = n; \\
 F &= \left(\lambda^2 - 1 \right) \sin \alpha \cos \alpha = p.
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

Обозначения коэффициентов в одноосной среде m, n и p использовались в [1, ч.1]. Выражение потенциала в одноосной среде принимает вид:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{I\rho_m}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + By^2 + Cz^2 - 2Fyz}} = \\
 &= \frac{I\rho_m}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{x^2 + my^2 + nz^2 - 2pyz}}.
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

Радикал в знаменателе выражений (5.24) и (5.26) является кажущимся расстоянием r_k от источника поля до точки наблюдений в эквивалентном изотропном пространстве, в котором расстояния по направлениям главных осей тензора удельного сопротивления увеличены: по оси ρ_n в λ раз, по оси ρ_m в λ_t раз:

$$r_k = \sqrt{r_t^2 + \lambda^2 r_m^2 + \lambda^2 r_n^2} . \quad (5.27)$$

где r_t , r_m и r_n – проекции истинного расстояния r на направления главных осей тензора удельного сопротивления ρ_t , ρ_m и ρ_n соответственно (рис. 5.6).

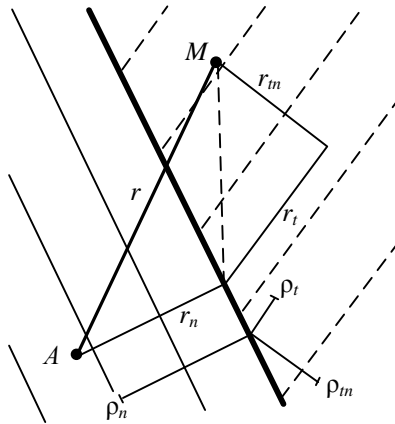


Рис. 5.6. Определение кажущегося расстояния r_k в анизотропной среде

Теперь можно написать выражение:

$$U = \frac{I\rho_m \lambda_t}{4\pi} \frac{1}{r_k} , \quad (5.28)$$

представляющее собой уравнение потенциала в общем виде.

5.5. Учет границы раздела "земля-воздух"

Если все пространство заполнено анизотропной средой, ток с точечного источника растекается по радиальным прямым во все стороны. Потенциал в произвольной точке M , расположенной в нижнем полупространстве на расстоянии r от источника, определяется уравнением (5.28). Если верхнее полупространство заполнено непроводящим воздухом, при расположении источника на границе раздела ток может растекаться только в нижнюю часть пространства (рис. 5.7). При неизменной силе тока, стекающего с источника, плотность тока в этом случае вдвое больше, чем в безграничном пространстве. Так как конфигурация токовых линий не изменяется, потенциал в точке M тоже вдвое больше, чем в безграничной среде,

$$U = \frac{I \rho_m \lambda_t}{2\pi r_k} \cdot 1. \quad (5.29)$$

Если поменять местами источник тока A и точку наблюдений M , согласно теореме взаимности потенциал в точке наблюдений не изменится.

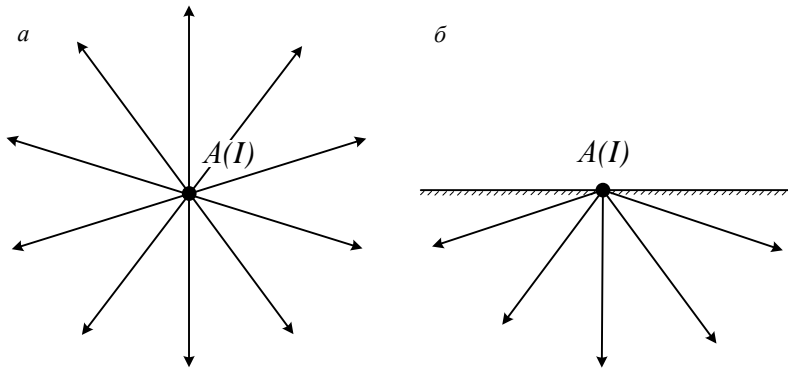


Рис. 5.7. Растекание тока в безграничной анизотропной среде (а) и в анизотропном полупространстве (б)

Таким образом, если точка наблюдений или источник тока располагаются на поверхности земли, учет границы раздела земля-воздух производится путем удвоения потенциала, т. е. так же, как в случае изотропного полупространства.

Если ни источник поля, ни точка наблюдений не находятся на поверхности земли, учет границы раздела "земля-воздух" можно выполнить с помощью фиктивного источника A' , аналогично случаю изотропного полупространства. Только в случае трехосной анизотропной среды фиктивный источник A' надо сместить относительно отражения действительного источника A в плоскости поверхности земли по направлениям осей x и y .

Пусть фиктивный источник имеет координаты x' , y' , $-2H$. Тогда, полагая среду безграничной, содержащей действительный A и фиктивный A' источники, с каждого из которых стекает ток I , можно записать выражение для потенциала:

$$U = \frac{I\rho_m \lambda_t}{4\pi} \left[\frac{1}{r_k(x, y, z)} + \frac{1}{r_k[(x-x'), (y-y'), (z+2H)]} \right]. \quad (5.30)$$

Для нахождения неизвестных координат фиктивного источника x' и y' воспользуемся условиями на границе раздела. Согласно (5.29) потенциал на поверхности земли равен удвоенному потенциалу в безграничной среде. Чтобы удовлетворить этому условию надо в правой части уравнения (5.30) положить при $z = -H$ слагаемые, равными:

$$r_k(x, y, -H) = r_k[(x-x'), (y-y'), H]. \quad (5.31)$$

Второе уравнение можно написать, используя условие равенства нулю вертикальной компоненты плотности тока,

$$j_{z(z=-H)} = 0. \quad (5.32)$$

Решая совместно уравнения (5.31) и (5.32), найдем координаты фиктивного источника:

$$\begin{aligned}
 x' &= -2 \frac{BE + DF}{AB - D^2} H, \\
 y' &= -2 \frac{DE + AF}{AB - D^2} H.
 \end{aligned}
 \tag{5.33}$$

Так как координаты отрицательны, фиктивный источник смещен относительно отражения действительного источника в направлениях, противоположных направлениям падения и скатывания слоистости.

В одноосной среде $\lambda_r=1$ и выражения координат фиктивного источника принимают вид:

$$x'=0, \quad y' = -2 \frac{F}{B} H = -2 \frac{(\lambda^2 - 1) \sin \alpha \cos \alpha}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha} H.
 \tag{5.34}$$

Кажущееся расстояние между действительным и фиктивным источниками равно удвоенной кажущейся глубине расположения источника поля. На поверхности земли максимум потенциала наблюдается в точке пересечения линии, соединяющей действительный и фиктивный источники с поверхностью земли.

Таким образом, на поверхности трехосной анизотропной среды максимум потенциала смещен относительно проекции источника по направлению вкост слоистости на расстояние

$$d_y = \frac{DE + AF}{AB - D^2} H
 \tag{5.35}$$

и по направлению простирания слоистости на расстояние

$$d_x = \frac{BE + DF}{AB - D^2} H.
 \tag{5.36}$$

Смещение происходит по направлениям, противоположным направлениям падения и скатывания слоистости.

В одноосной среде $d_x=0$ и смещение происходит только по направлению вкост слоистости в сторону восстания на расстояние

$$d = d_y = \frac{F}{B} H = \frac{(\lambda^2 - 1) \sin \alpha \cos \alpha}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha} H. \quad (5.37)$$

Если рассматривать действительный и фиктивный источники в эквивалентном пространстве, то фиктивный источник оказывается отражением действительного в плоскости границы раздела. В эквивалентном пространстве граница раздела поворачивается относительно истинной плоскости поверхности земли на угол ψ . На рис. 5.8 показаны действительный и фиктивный источники и положение поверхности земли в реальном и эквивалентном пространстве для случая одноосной среды. Как следует из рисунка, в плоскости yAz угол между реальной P и эквивалентной P' границами раздела равен $\operatorname{arctg} \frac{d_y}{H}$.

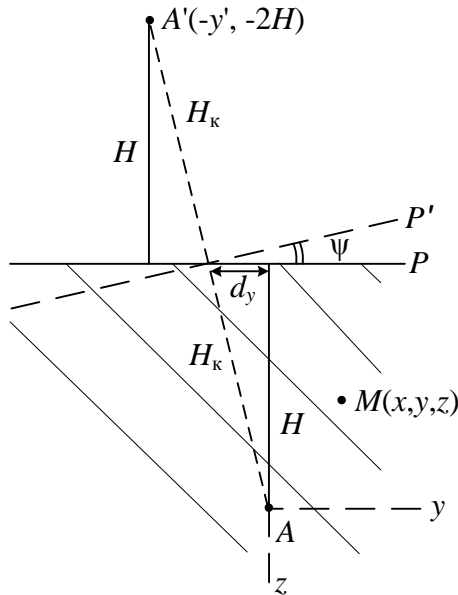


Рис. 5.8. К учету границы раздела "земля – воздух"

В случае трехосной среды эквивалентная граница раздела поворачивается относительно реальной поверхности земли еще и в плоскости xAz на угол $\operatorname{arctg} \frac{d_x}{H}$. Полное значение угла пово-

рота границы раздела в этом случае равно $\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{d_y^2 + d_x^2}}{H}$. Этот угол наблюдается в вертикальной плоскости, проходящей через действительный и фиктивный источники.

5.6. Форма изолиний потенциала на поверхности анизотропного полупространства

Положив в уравнении потенциала в безграничной среде $z = -H$ и поделив выражение (5.24) на 2, получим выражение потенциала на поверхности анизотропного полупространства:

$$U = \frac{I\rho_m \lambda_t}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{Ax^2 + By^2 + CH^2 - 2Dxy + 2ExH + 2FyH}}. \quad (5.38)$$

Приравняв потенциал постоянной величине U_{const} , равной отметке изолинии, получим уравнение эквипотенциальной линии:

$$Ax^2 + By^2 + CH^2 - 2Dxy + 2ExH + 2FyH = \left(\frac{I\rho_m \lambda_t}{2\pi U_{\text{const}}} \right) = a^2. \quad (5.39)$$

Выполнив стандартный анализ уравнения второго порядка, можно показать, что оно описывает эллипс, центр которого смещен относительно начала координат по осям x и y в сторону отрицательных значений (члены, содержащие эти координаты в первой степени положительны). Величина смещения d_x и d_y определяется формулами (5.35) и (5.36), полученными ранее из других соображений. Отношение полуосей изолиний

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{A+B+\sqrt{(B-A)^2+4D^2}}{A+B-\sqrt{(B-A)^2+4D^2}}}. \quad (5.40)$$

В случае одноосной среды $D=0$, $A=1$ и

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha}. \quad (5.41)$$

Так как в уравнении изолинии потенциала есть член, содержащий произведение координат x и y , оси изолинии a и b повернуты относительно осей координат на угол

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \cos \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}{\frac{\lambda^2 - 1}{\lambda_t^2 - 1} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta - \sin^2 \beta}. \quad (5.42)$$

В случае одноосной среды знаменатель аргумента арктангенса обращается в бесконечность и угол $\varphi=0$.

Угол поворота эквипотенциальной линии относительно простираения слоистости тем больше, чем меньше разница между λ и λ_t . Он возрастает также при уменьшении угла падения слоистости. При $\alpha \rightarrow 0$ $\varphi \rightarrow \beta$. Поэтому при пологих углах падения слоистости и больших углах β изолиния потенциала может ориентироваться вкрест простираения слоистости.

Зависимость угла поворота изолинии φ от угла скатывания β при разных значениях α и λ_t имеет различный характер. Существуют критические значения этих параметров, при переходе через которые зависимость φ от β меняется. При $\alpha < \alpha_{\text{крит}}$ и постоянном λ_t , или при $\lambda_t > \lambda_{t \text{ крит}}$ и постоянном α при увеличении β угол поворота изолинии φ монотонно возрастает от нуля до β (рис. 5.9). При $\alpha > \alpha_{\text{крит}}$ и постоянном λ_t или при $\lambda_t < \lambda_{t \text{ крит}}$ и постоянном α по мере увеличения β угол φ сначала растет, достигает максимума, а затем убывает до нуля при $\beta=90^\circ$ (см. рис. 5.9).

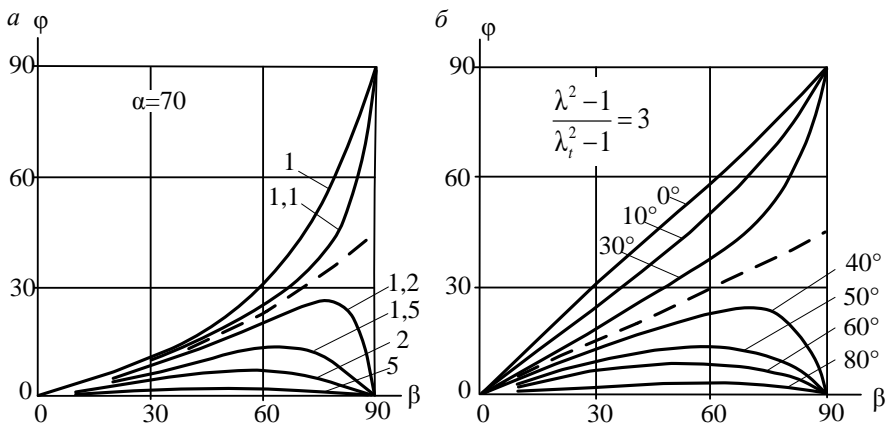


Рис. 5.9. Графики зависимости угла φ между большой осью линии равного потенциала и простиранием сланцеватости от угла скатывания β :

a – параметр кривых $\frac{\lambda^2 - 1}{\lambda_t^2 - 1}$, параметр штриховой линии $\left(\frac{\lambda^2 - 1}{\lambda_t^2 - 1} \right)_{\text{крит.}} = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \approx 1,13$;

δ – параметр кривых α , $\alpha_{\text{крит.}} = \arcsin \sqrt{\frac{\lambda_t^2 - 1}{\lambda^2 - 1}} \approx 35^\circ 20'$

Эллиптичность изолиний потенциала в трехосной анизотропной среде зависит от всех ее параметров – λ , λ_t , α и β . В случае вертикального падения слоистости, если $\beta=0$ $\frac{a}{b} = \lambda$, при $\beta=90^\circ$ $\frac{a}{b} = \frac{\lambda}{\lambda_t}$. При малых углах падения слоистости отношение осей изолиний стремится к λ_t (рис. 5.10).

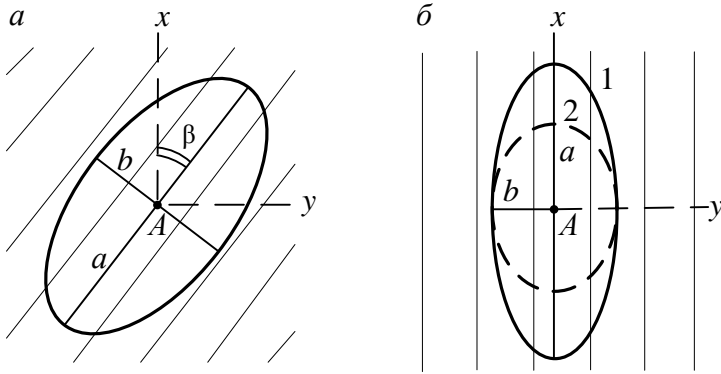


Рис. 5.10. Частные случаи изолиний потенциала ($\lambda=2,5; \lambda_t=1,8$):
 $a - \alpha \rightarrow 0, \varphi = \beta, a/b \rightarrow \lambda_t = 1,8$; $b - \alpha = 90^\circ; 1 - \beta = 0, a/b = \lambda = 2,5; 2 - \beta = 90^\circ, a/b = \lambda / \lambda_t = 1,4$

Таким образом, в общем случае эллиптичность изолиний потенциала в трехосной анизотропной среде меньше, чем в одноосной.

5.7. Кажущееся сопротивление в анизотропной среде

В анизотропной среде кажущееся сопротивление, вычисленное через потенциал точечного источника A , в точке наблюдений M , расположенной на поверхности земли, определяется уравнением:

$$\rho_k = 2\pi r \frac{U}{I} = 2\pi r \frac{1}{I} \frac{\rho_m \lambda_t}{2\pi} \frac{1}{r_k} = \rho_m \lambda_t \frac{r}{r_k}. \quad (5.43)$$

Если точка наблюдений отнесена от источника поля по направлению оси ρ_t , $r_k = r$ и $\rho_k = \rho_{kt} = \rho_m \lambda_t$. Когда отрезок $r = AM$, соединяющий источник и точку наблюдений, ориентирован

перпендикулярно слоистости $r_k = \lambda r_k$, $\rho_k = \rho_{kn} = \frac{\rho_m \lambda_t}{\lambda} = \rho_t \lambda_t$. При

ориентировке r по направлению оси тензора сопротивления ρ_m $r_k = \lambda_t r$, а кажущееся сопротивление $\rho_m = \rho_m$. Таким образом, в точках выхода на поверхность земли прямых линий, проведенных из источника поля по направлениям главных осей тензора

удельного сопротивления, наблюдаются характерные значения кажущегося сопротивления, равные главным значениям тензора ρ .

План изоом на поверхности трехосного анизотропного полупространства имеет сложный вид. Изолинии ρ_k представляют собой кривые второго порядка. Вокруг точек, в которых ρ_k равно ρ_{kl} и ρ_{kt} , наблюдаются семейства эллипсов, ориентированных параллельно осям y и x соответственно (рис. 5.11). Точка с $\rho_k = \rho_{kt}$ соответствует пересечению двух прямолинейных изоом. В ограниченных этими прямыми линиями четырех секторах изолинии ρ_k представляют собой семейства гипербол. В секторах, в которых наблюдаются эллиптические изоомы, они отделяются от гипербол изолиниями, имеющими форму парабол (на рисунке показаны жирными линиями).

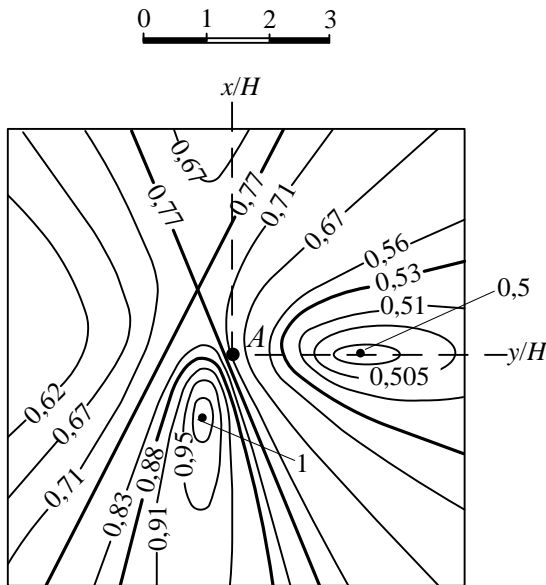


Рис. 5.11. План изоом в поле точечного источника на поверхности анизотропной среды:

$\rho_m=0,77$; $\lambda=2$; $\lambda_t=1,3$. Жирными линиями выделены параболические и прямые изоомы

Рассмотрим кажущееся сопротивление, измеряемое трехэлектродной установкой AMN , расположенной на поверхности земли. Размер установки r много больше длины приемной линии MN . Установка ориентирована по направлению, образующему с осью x угол θ (рис. 5.12). Введем полярную систему координат:

$$\begin{aligned}x &= r \cos \theta; \\ y &= r \sin \theta.\end{aligned}$$

Подставив значения x и y в полярной системе координат в уравнение потенциала (5.38) при $H=0$ и выполнив его дифференцирование, найдем выражение кажущегося сопротивления:

$$\begin{aligned}\rho_k &= 2\pi r^2 \frac{E}{I} = 2\pi r^2 \frac{1}{I} \left(-\frac{\partial U}{\partial r} \right) = \\ &= -\frac{2\pi r^2}{I} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{I \rho_m \lambda_t}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{Ar^2 \cos^2 \theta + Br^2 \sin^2 \theta - 2Dr^2 \sin \theta \cos \theta}} \right) = \\ &= \frac{\rho_m \lambda_t}{\sqrt{A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta - 2D \sin \theta \cos \theta}}.\end{aligned}\quad (5.44)$$

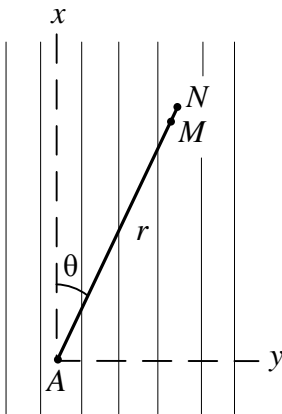


Рис. 5.12. К расчету ρ_k в анизотропной среде

Так как выражения кажущегося сопротивления и потенциала отличаются только на постоянный множитель, полярная диаграмма ρ_k имеет такую же форму, как изолиния потенциала, т. е. представляет собой эллипс, подобный эквипотенциальной линии. Поэтому все выводы, сделанные в предыдущем разделе о форме, отношении осей и ориентировке изолинии потенциала, в полной мере применимы к полярной диаграмме ρ_k . Заметим также, что в однородной анизотропной среде кажущиеся сопротивления, измерен-

ные трехэлектродной, двухэлектродной, симметричной и осевой дипольной установками одинаковы и все описываются формулой (5.44).

Рассмотрим ρ_k для характерных частных случаев. Пусть слоистость горизонтальна, т. е. $\alpha=0$. Тогда, подставив значения коэффициентов A , B и D и выполнив элементарные преобразования, получим:

$$\rho_k \Big|_{\alpha \rightarrow 0} = \frac{\rho_m \lambda_t}{\sqrt{1 + (\lambda_t^2 - 1)(\sin \beta \cos \theta - \cos \beta \sin \theta)^2}}. \quad (5.45)$$

Если $\theta=\beta$, т. е. установка ориентирована по оси ρ_t тензора удельного сопротивления, то

$$\rho_{kt} \Big|_{\theta=\beta} = \rho_m \lambda_t.$$

При $\theta=\beta \pm 90^\circ$, т. е. когда установка ориентирована по оси ρ_m тензора удельного сопротивления,

$$\rho_{km} = \rho_m.$$

Если $\alpha=90^\circ$, т. е. падение слоистости вертикальное,

$$\rho_k \Big|_{\alpha = 90^\circ} = \frac{\rho_m \lambda_t}{\sqrt{[1 + (\lambda_t^2 - 1)\sin^2 \beta] \cos^2 \theta + \lambda^2 \sin^2 \theta}}. \quad (5.46)$$

Когда установка ориентирована по простиранию слоистости, т. е. $\theta=0$, величина кажущегося сопротивления зависит от угла β :

$$\begin{aligned} \text{при } \beta=0 \quad \rho_k &= \rho_{kt} = \rho_m \lambda_t, \\ \text{при } \beta=90^\circ \quad \rho_k &= \rho_{km} = \rho_m. \end{aligned}$$

Если установка ориентирована вкрест простирания слоистости, т. е. $\theta=90^\circ$, ориентировка установки совпадает с направлением оси ρ_n тензора удельного сопротивления и

$$\rho_k = \rho_{kn} = \frac{\rho_m \lambda}{\lambda} = \rho_t \lambda_t.$$

Таким образом, для истинных удельных сопротивлений и для измеренных по этим направлениям кажущихся сопротивлений наблюдаются противоположные соотношения:

$$\begin{aligned} \rho_t &< \rho_m < \rho_n; \\ \rho_{kt} &> \rho_{km} > \rho_{kn}. \end{aligned}$$

Это явление получило название парадокса анизотропии. Причиной его является повышение плотности тока по направлению наименьшего удельного сопротивления и уменьшение по направлению наибольшего удельного сопротивления.

Согласно уравнениям (5.16) по направлению оси ρ_t плотность тока $j_t = \frac{C}{\rho_t^{3/2} r^2}$, а по направлению оси ρ_n плотность тока

$j_n = \frac{C}{(\rho_t \lambda^2)^{3/2} r^2}$. Отношение плотностей тока по этим

направлениям $j_t/j_n = \lambda^3$, а отношение удельных сопротивлений $\rho_n/\rho_t = \lambda^2$. Отсюда:

$$\frac{\rho_{kt}}{\rho_{kn}} = \frac{j_t \rho_t}{j_n \rho_n} = \frac{\lambda^3}{\lambda^2} = \lambda.$$

Аналогично доказывается, что

$$\frac{\rho_{kt}}{\rho_{km}} = \lambda_t.$$

В одноосной анизотропной среде $\lambda_t=1$ и кажущееся сопротивление

$$\rho_k \Big|_{\lambda_t=1} = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}}. \quad (5.47)$$

При горизонтальном залегании слоистости

$$\rho_k |_{\alpha=0} = \rho_{kt} \rho_m. \quad (5.48)$$

Если слоистость вертикальная,

$$\rho_k \Big|_{\alpha=90^\circ} = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \theta}}. \quad (5.49)$$

В этом случае ρ_k зависит от ориентировки установки:

$$\text{при } \theta=0 \quad \rho_k = \rho_{kt} = \rho_m,$$

при $\theta=90^\circ$ $\rho_k=\rho_{kn}=\rho_m/\lambda=\rho_t$.

Таким образом, в одноосной анизотропной среде максимальное и минимальное кажущиеся сопротивления в λ_t раз меньше, чем в трехосной среде с теми же значениями ρ_m и λ .

5.8. Анизотропия поляризуемости

Поляризуемость анизотропной среды. Рассмотрим поляризуемость слоистой среды. Пусть среда состоит из чередующихся прослоек с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 и поляризуемостями η_1 и η_2 . Относительное содержание прослоек соответственно $1-v_2$ и v_2 . Тогда поперечное и продольное удельные сопротивления среды определяются уравнениями:

$$\rho_n = \rho_1(1-v_2) + \rho_2 v_2, \quad (5.50)$$

$$\rho_t = \frac{1}{[(1-v_2)/\rho_1] + (v_2/\rho_2)}. \quad (5.51)$$

Введем эффективные удельные сопротивления слоев:

$$\rho_1^* = \frac{\rho_1}{1-\eta_1} \quad \text{и} \quad \rho_2^* = \frac{\rho_2}{1-\eta_2}.$$

Подставив эти удельные сопротивления в уравнения (5.50) и (5.51), получим эффективные поперечное и продольное сопротивления среды:

$$\rho_n^* = \frac{\rho_1}{1-\eta_1}(1-v_2) + \frac{\rho_2}{1-\eta_2} v_2, \quad (5.52)$$

$$\rho_t^* = \frac{1}{\frac{(1-\eta_1)(1-v_2)}{\rho_1} + \frac{(1-\eta_2)v_2}{\rho_2}}. \quad (5.53)$$

Поперечная поляризуемость среды:

$$\begin{aligned} \eta_n &= 1 - \frac{\rho_n}{\rho_n^*} = 1 - \frac{\rho_1(1-v_2) + \rho_2 v_2}{\rho_1(1-\eta_2)(1-v_2) + \rho_2(1-\eta_1)v_2} (1-\eta_1)(1-\eta_2) = \\ &= \frac{\rho_1 \eta_1 (1-\eta_2)(1-v_2) + \rho_2 \eta_2 (1-\eta_1)v_2}{\rho_1(1-\eta_2)(1-v_2) + \rho_2(1-\eta_1)v_2}. \end{aligned} \quad (5.54)$$

При $\rho_2 \gg \rho_1$ $\eta_n \rightarrow \eta_2$, при $\rho_2 \ll \rho_1$ $\eta_n \rightarrow \eta_1$.

Продольная поляризуемость

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho_t}{\rho_t^*} = 1 - \frac{[(1 - \eta_1)(1 - v_2)/\rho_1] + [(1 - \eta_2)v_2/\rho_2]}{[(1 - v_2)/\rho_1] + (v_2/\rho_2)} = \frac{\rho_2 \eta_1 (1 - v_2) + \rho_1 \eta_2 v_2}{\rho_1 v_2 + \rho_2 (1 - v_2)}. \quad (5.55)$$

При $\rho_2 \gg \rho_1$ $\eta_t \rightarrow \eta_1$, при $\rho_2 \ll \rho_1$ $\eta_t \rightarrow \eta_2$.

Таким образом, поперечная поляризуемость определяется в основном поляризуемостью прослоек с более высоким удельным сопротивлением, а продольная поляризуемость – поляризуемостью более проводящих прослоек.

Совершенно аналогично ведет себя поляризуемость породы, содержащей однообразно ориентированные неизометричные включения, отличающиеся от основной массы по удельному сопротивлению и поляризуемости.

Рассмотренная закономерность создает предпосылки для определения распределения поляризующегося материала (обычно это рудная вкрапленность) между компонентами среды. Такая информация в ряде случаев может быть использована при оценке перспективности участков и отдельных аномалий.

Кажущаяся поляризуемость в анизотропной среде.

Кажущееся сопротивление на поверхности анизотропного полупространства

$$\rho_k = \frac{\rho_m}{\sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}},$$

где α – угол падения слоистости, θ – угол между направлением установки и простиранием пород.

Если среда поляризуется, в эту формулу надо подставить эффективные значения среднего геометрического удельного сопротивления и коэффициента анизотропии:

$$\rho_m^* = \sqrt{\rho_n^* \rho_t^*} = \sqrt{\frac{\rho_n}{1-\eta_n} \cdot \frac{\rho_t}{1-\eta_t}} = \frac{\rho_m}{\sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)}}, \quad (5.56)$$

$$\lambda_{\kappa}^* = \sqrt{\frac{\rho_n^*}{\rho_t^*}} = \sqrt{\frac{\rho_n}{1-\eta_n} \cdot \frac{1-\eta_t}{\rho_t}} = \lambda \sqrt{\frac{1-\eta_t}{1-\eta_n}}. \quad (5.57)$$

Кажущееся сопротивление на поверхности анизотропного поляризующегося полупространства:

$$\begin{aligned} \rho_{\kappa}^* &= \frac{\rho_m^*}{\sqrt{1 + (\lambda^{*2} - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}} = \\ &= \frac{\rho_m}{\sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)} \sqrt{1 + \left(\lambda^2 \frac{1-\eta_t}{1-\eta_n} - 1 \right) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}}. \end{aligned} \quad (5.58)$$

Кажущаяся поляризуемость:

$$\eta_{\kappa} = 1 - \frac{\rho_{\kappa}}{\rho_{\kappa}^*} = 1 - \sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)} \sqrt{\frac{1 + \left(\lambda^2 \frac{1-\eta_t}{1-\eta_n} - 1 \right) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha \sin^2 \theta}}. \quad (5.59)$$

Если установка ориентирована по простиранию слоистости, т. е. $\theta=0$,

$$\eta_{\kappa t} = 1 - \sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)}. \quad (5.60)$$

Так как обычно $\eta_n \ll 1$ и $\eta_t \ll 1$, можно полагать

$\sqrt{1-\eta_n} \approx 1 - \eta_n / 2$ и $\sqrt{1-\eta_t} \approx 1 - \eta_t / 2$, тогда

$$\eta_{\kappa t} \approx 1 - \left(1 - \frac{\eta_n}{2}\right) \left(1 - \frac{\eta_t}{2}\right) = 1 - \left(1 - \frac{\eta_n}{2} - \frac{\eta_t}{2} + \frac{\eta_n \eta_t}{4}\right) \approx \frac{\eta_n + \eta_t}{2}. \quad (5.61)$$

Таким образом, продольная кажущаяся поляризуемость приблизительно равна среднему арифметическому из поперечной и продольной истинных поляризуемостей и не зависит от угла падения слоистости. Такая же кажущаяся поляризуемость наблюдается при любой ориентировке установки в случае горизонтального залегания слоистости.

При ориентировке установки вкрест простирания слоистости, когда $\theta=90^\circ$, поперечная кажущаяся поляризуемость

$$\eta_{kn} = 1 - \sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)} \sqrt{\frac{1 + \left(\lambda^2 \frac{1-\eta_t}{1-\eta_n} - 1 \right) \sin^2 \alpha}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha}}. \quad (5.62)$$

При вертикальном падении слоистости

$$\eta_{kn} \left(\alpha = 90^\circ \right) = 1 - \sqrt{(1-\eta_n)(1-\eta_t)} \sqrt{\frac{1-\eta_t}{1-\eta_n}} = 1 - (1-\eta_t) = \eta_t. \quad (5.63)$$

Таким образом, если установка ориентирована вкрест простирания слоистости, при изменении угла падения от 90° до 0° кажущаяся поляризуемость изменяется от η_t до

$$\frac{\eta_n + \eta_t}{2}.$$

Для кажущейся поляризуемости, как и для кажущегося сопротивления, существует парадокс анизотропии:

$$\begin{aligned} \eta_t > \eta_n & \quad \eta_{kt} < \eta_{kn}, \\ \eta_t < \eta_n & \quad \eta_{kt} > \eta_{kn}. \end{aligned} \quad (5.64)$$

Выполняя измерения кажущейся поляризуемости при различной ориентировке установки, можно оценить характер распределения поляризующегося материала между проводящими и высокоомными компонентами породы.

6. ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД. ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

6.1. Определение параметров анизотропной среды

Принцип определения параметров анизотропной среды. Определение исходных данных. Для характеристики трехосной анизотропной среды необходимо определить пять параметров: λ , λ_r , α , β и φ . Уравнение угла поворота большой оси изолинии относительно простирания слоистости известно (5.42) и по нему угол φ может быть определен, если известны остальные параметры. Чтобы найти эти параметры, необходимо составить систему из четырех уравнений. Для этого можно использовать уравнения, определяющие отношение осей изолинии потенциала a/b и смещения центра изолинии (максимума потенциала) относительно проекции источника поля на поверхность земли. Поскольку точное направление простирания слоистости неизвестно, вместо смещений центра изолинии по осям координат d_x и d_y целесообразно использовать смещения по направлениям осей эквипотенциальной линии:

$$\begin{aligned}d_a &= d_x \cos \varphi + d_y \sin \varphi, \\d_b &= d_y \cos \varphi - d_x \sin \varphi.\end{aligned}\quad (6.1)$$

Таким образом, получаются три уравнения. Для составления четвертого уравнения можно использовать расстояние l_a от центра изолинии до экстремума градиента потенциала по профилю, совпадающему с большой осью изолинии (см. рис. 5.5),

$$l_a = H \sqrt{\frac{Q}{2M}}, \quad (6.2)$$

где $M = \frac{A+B - \sqrt{(B-A)^2 + 4D^2}}{2}$;

$$Q = \frac{C(AB - D^2) - E(BE + DF) - F(AF + DE)}{AB - D^2}.$$

Таким образом, можно записать систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{a}{b} = f_1(\lambda, \lambda_t, \alpha, \beta) \\ d_a = f_2(\lambda, \lambda_t, \alpha, \beta) \\ d_b = f_3(\lambda, \lambda_t, \alpha, \beta) \\ l_a = f_4(\lambda, \lambda_t, \alpha, \beta) \end{cases} \quad (6.3)$$

Решив эту систему уравнений можно найти искомые параметры.

В случае одноосной среды достаточно взять из этой системы два уравнения:

$$\begin{cases} \frac{a}{b} = f_1(\lambda, \alpha) \\ d_b = f_3(\lambda, \alpha) \end{cases} \quad (6.4)$$

Вместо любого из этих уравнений можно взять четвертое уравнение $l_a = f_4(\lambda, \alpha)$.

Точность определения параметров среды зависит от точности определения исходных данных. Так как реальные результаты измерений всегда искажены влиянием различных неоднородностей среды, следует использовать не одну, а несколько изолиний потенциала и определять усредненные исходные параметры. При их определении должны исключаться искажения, вызванные неоднородностями среды по сопротивлению.

Для определения отношения осей изолинии a/b удобно строить график зависимости λ_k от размера изолинии и по нему оценивать усредненное значение. Чтобы определить смещения центра изолиний от проекции источника поля, надо построить графики потенциала по профилям, проходящим по осям эквипотенциальных линий. К графикам проводится несколько хорд. Затем строятся линии, соединяющие середины хорд. По ним определяется усредненное положение центра изолиний и его смещения d_a и d_b относительно проекции источника поля.

Для определения расстояния l_a от точки перехода графика градиента потенциала через нуль до его экстремума нет необходимости выполнять специальные измерения ΔU . Этот исходный параметр можно определить по графику потенциала, построенному по плану изолиний. Экстремуму градиента потенциала соответствует точка перегиба графика потенциала, которую можно определить с помощью логарифмической палетки, представляющей собой график нормального поля точечного источника (рис. 6.1). Так как нулевой уровень потенциала неизвестен, палетка построена не относительно нуля, а относительно максимального значения потенциала $U^* = U_{\text{макс}} - U$. Таким же образом должен быть построен и практический график. Совместив практическую и теоретическую кривые, по значению, отсекаемому на оси x практической кривой линией l палетки, определяют искомую величину l_a .

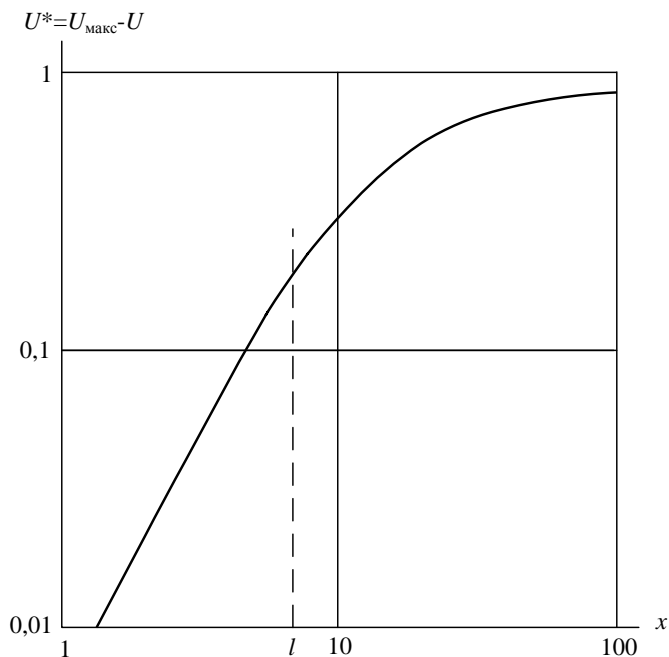


Рис. 6.1. Палетка для определения расстояния до экстремумов графика ΔU по графику потенциала

Способы определения параметров анизотропной среды. Так как уравнения системы (6.3) для трехосной среды весьма громоздки, решить ее элементарными алгебраическими способами невозможно. По-видимому, ее можно решать итерационным способом с использованием компьютера. Можно воспользоваться способом подбора, добиваясь приемлемого совпадения наблюдаемого и рассчитанного при заданных параметрах полей. Можно пользоваться номограммами, построенными на основе решения прямой задачи. Такие номограммы построены для углов падения слоистости от 50° до 90° . Для более пологих углов падения построить номограммы не удалось.

Более универсальный и удобный аналитический способ, предложенный С. С. Сысковым, основан на использовании характерных значений кажущегося сопротивления на поверхности земли в поле погруженного заземления. В этих точках, соответствующих выходу на поверхность земли прямых линий, проведенных из источника поля по направлениям главных осей тензора удельного сопротивления, кажущиеся сопротивления равны $\rho_{kl} = \rho_l \lambda_t$, $\rho_{kt} = \rho_m \lambda_t$, $\rho_{km} = \rho_m$ (см. рис. 5.11).

Непосредственное определение положения характерных точек и значений ρ_k в них затруднительно. Это связано с тем, что на фоне искажений от различных неоднородностей, неизбежных в реальных условиях, положение характерных точек и значения ρ_k в них определяются с погрешностями. Неподвижный электрод N необходимо относить на очень большое расстояние, так как рассмотренные особенности поведения ρ_k наблюдаются, если кажущееся сопротивление вычисляется через абсолютные значения потенциала. При недостаточном удалении электрода N план изоом резко усложняется. Поэтому используется связь между характерными точками и исходными данными a/b , d_a , d_b и l_a , которые определяются более надежно.

Введем систему координат x' , y' , z' , в которой начало по-прежнему совпадает с источником поля, а оси x' и y' ориентированы по направлениям большой и малой осей изолиний потенциала соответственно. В этой системе координат уравнение потенциала можно привести к виду:

$$U = \frac{I \rho_t \lambda \lambda_t}{2\pi \sqrt{w}} \frac{1}{\sqrt{(x' - d_a)^2 + \lambda_{\kappa}^2 (y' - d_b)^2 + r_{\kappa}^2}}, \quad (6.5)$$

где w – коэффициент, зависящий от λ , λ_t , α , β ; $r_{\kappa} = l_a \sqrt{2}$ – кажущееся расстояние от источника поля до большой оси изолинии потенциала.

Кажущееся сопротивление

$$\begin{aligned} \rho_{\kappa} &= K \frac{U}{I} = 2\pi \sqrt{x'^2 + y'^2 + H^2} \cdot \frac{U}{I} = \\ &= \frac{\rho_t \lambda \lambda_t}{\sqrt{w}} \sqrt{\frac{x'^2 + y'^2 + H^2}{(x' - d_a)^2 + \lambda_{\kappa}^2 (y' - d_b)^2 + r_{\kappa}^2}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Введем параметр

$$t = \left(\frac{\rho_t \lambda \lambda_t}{\rho_{\kappa} \sqrt{w}} \right)^2 \quad (6.7)$$

и выразим все расстояния в долях глубины H до источника тока (эти приведенные расстояния будем обозначать теми же символами с чертой сверху). Теперь, после элементарных, но достаточно громоздких преобразований выражения (6.6) можно получить уравнение:

$$\begin{aligned} (1-t) \left(\bar{x}' - \frac{\bar{d}}{1-t} \right)^2 + \left(\lambda_{\kappa}^2 - t \right) \left(\bar{y}' - \frac{\lambda_{\kappa}^2 \bar{d}}{\lambda_{\kappa}^2 - t} \right)^2 + \\ + \left(\bar{d}_{\frac{a}{a}}^2 + \bar{r}_{\frac{\kappa}{\kappa}}^2 + \lambda_{\kappa}^2 \bar{d}_{\frac{b}{b}}^2 - t - \frac{\bar{d}_{\frac{a}{a}}^2}{1-t} - \frac{\lambda_{\kappa}^4 \bar{d}_{\frac{b}{b}}^2}{\lambda_{\kappa}^2 - t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Это уравнение линий второго порядка является уравнением изоом, план которых приведен на рис. 5.11. В особых точках, в которых кажущееся сопротивление равно ρ_t , ρ_n и ρ_m , свободный

член уравнения обращается в нуль. Приравняв свободный член нулю, получим уравнение для параметра t в особых точках:

$$t^3 + ft^2 + ct + d = 0. \quad (6.9)$$

В этом уравнении

$$f = -\left[1 + \bar{d}_a^2 + \bar{r}_k^2 + \lambda_k^2 \left(1 + \bar{d}_b^2\right)\right],$$

$$c = \lambda_k^2 \left(1 + \bar{d}_a^2 + \bar{d}_b^2 + \bar{r}_k^2\right) + \bar{r}_k^2$$

$$d = -\lambda_k^2 \bar{r}_k^2$$

Корни уравнения (6.9) связаны с характерными значениями кажущегося сопротивления в особых точках. Используя выражение (6.7), найдем эту связь:

при $t = t_{\text{макс}} = t_n$, $\rho_k = \rho_{kl} = \rho_t \lambda_t$, $\sqrt{t_{\text{макс}}} = \frac{\lambda}{\sqrt{w}}$;

при $t = t_{\text{мин}} = t_t$, $\rho_k = \rho_{kt} = \rho_m \lambda_t$, $\sqrt{t_{\text{мин}}} = \frac{\rho_t \lambda \lambda_t}{\rho_m \lambda_t \sqrt{w}} = \frac{1}{\sqrt{w}}$;

при $t = t_{\text{средн}} = t_m$, $\rho_k = \rho_m$, $\sqrt{t_{\text{средн}}} = \frac{\rho_t \lambda \lambda_t}{\rho_m \sqrt{w}} = \frac{\lambda_t}{\sqrt{w}}$.

Из этих соотношений следуют формулы для вычисления коэффициентов анизотропии:

$$\lambda = \sqrt{\frac{t_{\text{макс}}}{t_{\text{мин}}}}, \quad (6.10)$$

$$\lambda_t = \sqrt{\frac{t_{\text{средн}}}{t_{\text{мин}}}}.$$

Координаты особых точек плана изоом находятся из исходного уравнения и равны:

$$\bar{x}'_i = \frac{\bar{d}_a}{1 - t_i},$$

$$\bar{y}'_i = \frac{\lambda_{\kappa}^2 \bar{d}_b}{\lambda_{\kappa}^2 - t_i}.$$
(6.11)

Критерием проверки правильности решения является выполнение условия:

$$\bar{x}'_i \bar{x}'_j + \bar{y}'_i \bar{y}'_j = -1. \quad (6.12)$$

Это условие вытекает из того, что особые точки располагаются в вершинах треугольного основания пирамиды, имеющей прямые углы при вершине, совпадающей с началом координат.

Элементы залегания анизотропной среды определяются из очевидных геометрических соотношений:

$$\alpha = \arctg \sqrt{\bar{x}'_n{}^2 + \bar{y}'_n{}^2},$$

$$\beta = \arctg \sqrt{\frac{\bar{x}'_m{}^2 + \bar{y}'_m{}^2 + 1}{\bar{x}'_t{}^2 + \bar{y}'_t{}^2 + 1}},$$

$$\varphi = \arctg \frac{\bar{y}'_m - \bar{y}'_t}{\bar{x}'_m - \bar{x}'_t}.$$
(6.13)

В случае одноосной среды число неизвестных параметров уменьшается до двух. Для их определения необходимы два уравнения. В символической форме они были записаны в системе уравнений (6.4). Расшифруем эту запись:

$$\begin{cases} \frac{a}{b} = \sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha} \\ d_b = d_y = \frac{(\lambda^2 - 1) \sin \alpha \cos \alpha}{1 + (\lambda^2 - 1) \sin^2 \alpha} H \end{cases} \quad (6.14)$$

Вместо одного из этих уравнений, как указывалось выше, можно использовать уравнение для $l_a=l_x$.

6.2. Картирование анизотропных пород

Изучая электрическое поле с помощью установки, расположенной на поверхности земли, можно определять кажущийся коэффициент анизотропии λ_k и ориентировку большой оси изолинии потенциала в поле точечного источника. При отсутствии резких колебаний элементов залегания слоистости поведение λ_k отражает относительные изменения истинного коэффициента анизотропии λ . Ориентировка большой оси изолинии потенциала при достаточно крутом падении слоистости, а в случае $\lambda_r \ll \lambda$ при любом падении, с приемлемой точностью отражает направление простирания анизотропных пород. Таким образом, путем изучения анизотропии можно картировать породы, отличающиеся по λ , независимо от их дифференциации по удельному сопротивлению. Такое картирование наиболее эффективно при достаточно крутом падении слоистости. При пологой слоистости такие работы могут дать хорошие результаты только в случае практически одноосной анизотропии и высоких значениях λ . При выраженной трехосной анизотропии в этом случае будет определяться направление большой оси изолинии, которое может значительно отличаться от направления простирания слоистости – на угол φ , определяемый выражением (5.42).

Важной особенностью картирования по параметру λ является возможность определения направления простирания слоистости в каждой точке наблюдений. Это позволяет уверенно увязывать результаты наблюдений на соседних профилях даже в условиях сложного геоэлектрического строения участка.

Для картирования анизотропных пород могут применяться различные электроразведочные установки. Рассмотрим некоторые из них.

Прослеживание изолиний потенциала в поле точечного источника. В этом способе точечное питающее заземление располагают поочередно на пикетах профиля. Вокруг

заземления прослеживается линия равного потенциала. На всех пикетах изолиния задается на одном и том же расстоянии от питающего заземления с одной и той же стороны от него. Размер изолинии выбирается в зависимости от необходимой глубины исследования, т. е. практически от мощности рыхлых отложений. Второе питающее заземление относят на достаточно большое расстояние, чтобы можно было пренебречь его влиянием (порядка десятикратного радиуса изолинии).

Кажущийся коэффициент анизотропии вычисляется, как отношение осей изолинии: $\lambda_k = a/b$. Результаты представляют в виде графиков λ_k , под которыми указывают направления больших осей изолиний, которые при оговоренных выше условиях отражают простираение слоистости.

Способ прост в исполнении и интерпретации результатов. Он обладает низкой чувствительностью к неоднородностям среды по сопротивлению. Недостатком является низкая производительность измерений и отсутствие информации о сопротивлении среды.

Круговое профилирование. В этом способе могут использоваться симметричная, трехэлектродная или осевая дипольная установки. Обычно применяют симметричную установку. Трехэлектродная установка нетехнологична из-за необходимости устройства удаленного заземления.

Пусть установка $A_1M_1N_1B_1$ ориентирована под углом θ относительно простираения слоистости. Другая установка $A_2M_2N_2B_2$ повернута относительно первой на угол 90° (рис. 6.2). Измеряемые удельные сопротивления определяются уравнениями:

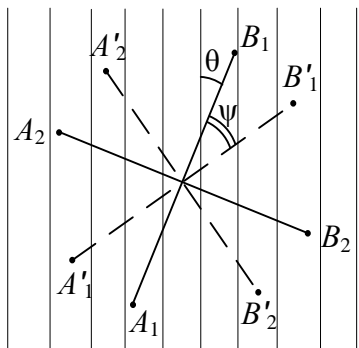


Рис. 6.2. Установка кругового профилирования

$$\rho_{\kappa 1} = \frac{\rho_m \lambda_t}{\sqrt{A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta - 2D \sin \theta \cos \theta}},$$

$$\rho_{\kappa 2} = \frac{\rho_m \lambda_t}{\sqrt{A \cos^2(\theta + 90^\circ) + B \sin^2(\theta + 90^\circ) - 2D \sin(\theta + 90^\circ) \cos(\theta + 90^\circ)}}.$$

Кажущийся коэффициент анизотропии определяется, как отношение $\rho_{\kappa 1}/\rho_{\kappa 2}$.

При $\theta=0$

$$\lambda_{\kappa} = \frac{\rho_{\kappa 1}}{\rho_{\kappa 2}} = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{\frac{[1 + (\lambda_t^2 - 1) \cos^2 \beta] \cos^2 \alpha + \lambda^2 \sin^2 \alpha}{1 + (\lambda_t^2 - 1) \sin^2 \beta}}. \quad (6.15)$$

В случае вертикального падения слоистости λ_{κ} зависит только от угла скатывания β . При $\beta=0$ λ_{κ} равен истинному коэффициенту анизотропии λ . При $\beta=90^\circ$ λ_{κ} равен отношению λ/λ_t . Таким образом, кажущийся коэффициент анизотропии ведет себя так же, как отношение осей изолинии потенциала. Направление большой оси полярной диаграммы ρ_{κ} , как и направление большой оси изолинии, совпадает с простиранием слоистости.

При $\theta=45^\circ$ обе установки одинаково ориентированы относительно слоистости и $\rho_{\kappa 1}=\rho_{\kappa 2}$, а $\lambda_{\kappa}=1$. Таким образом, при вертикальном падении слоистости в зависимости от ориентировки установки кажущийся коэффициент анизотропии может изменяться от λ до единицы.

Если падение слоистости не вертикальное, $\rho_{\kappa 1}$ и $\rho_{\kappa 2}$ различаются меньше и кажущийся коэффициент анизотропии меньше, чем при $\alpha=90^\circ$. Направление большой оси полярной диаграммы ρ_{κ} в этом случае отличается от простирания слоистости на угол φ в соответствии с формулой (5.42). При $\alpha \rightarrow 0$ большая ось полярной диаграммы ρ_{κ} ориентирована по направлению оси ρ_m тензора удельного сопротивления ($\varphi=\beta$), а $\lambda_{\kappa}=\lambda_t$.

На практике точное направление простирания обычно неизвестно. В этом случае, чтобы определить λ_k и направление простирания, надо выполнить измерения с несколькими парами по-разному ориентированных установок и построить полярную диаграмму ρ_k . Достаточно выполнить измерения с двумя парами взаимно перпендикулярных установок, повернутых одна относительно другой на угол ψ (см. рис. 6.2).

Результаты таких измерений позволяют получить систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{\rho_{k1}}{\rho_{k2}} = \lambda_{k1} = f(\lambda_k, \theta) \\ \frac{\rho'_{k1}}{\rho'_{k2}} = \lambda_{k2} = f(\lambda_k, \theta + \psi) \end{cases} \quad (6.16)$$

Решая эту систему, можно найти λ_k и θ . Практически наиболее удобно принимать угол ψ равным 45° .

Описанный прием определения λ_k и θ (две скрещенные установки) применим и в других способах картирования анизотропных пород, которые будут описаны ниже.

Способ кругового профилирования обладает достаточно высокой производительностью, позволяет в каждой точке определять λ_k , ρ_k и направление простирания слоистости (с точностью до угла ϕ). Недостатком способа является высокая чувствительность к неоднородностям среды по сопротивлению. Поэтому в сложной геоэлектрической обстановке, характерной для рудных районов, метод часто оказывается мало пригодным.

Меньшей чувствительностью к неоднородностям среды по удельному сопротивлению обладает круговое профилирование с двухэлектродной установкой. В этом способе получаются результаты, близкие к результатам прослеживания изолинии потенциала. Но этот способ нетехнологичен из-за необходимости устройства двух удаленных заземлений (B и N).

Способ крестообразной установки. Расположим два приемных электрода на расстоянии r от питающего заземления A . Один приемный электрод (M_1) отнесем по направлению

вокруг простирания слоистости, другой (M_2) – по простиранию слоистости (рис. 6.3). Разность потенциалов в такой установке:

$$\begin{aligned} \Delta U_{21} &= U_{M_2} - U_{M_1} = \frac{I\rho_m \lambda_t}{2\pi} \frac{1}{r} - \frac{I\rho_m \lambda_t}{2\pi} \frac{1}{\lambda_k r} = \\ &= \frac{I\rho_m \lambda_t}{2\pi r} \left(1 - \frac{1}{\lambda_k}\right) = \frac{I\rho_{kt}}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{\lambda_k}\right). \end{aligned} \quad (6.17)$$

Решив уравнение относительно λ_k , получим:

$$\lambda_k = \frac{\rho_{kt}}{\rho_{kt} - 2\pi r \frac{\Delta U_{21}}{I}} = \frac{\rho_{kn} + 2\pi r \frac{\Delta U_{21}}{I}}{\rho_{kn}}. \quad (6.18)$$

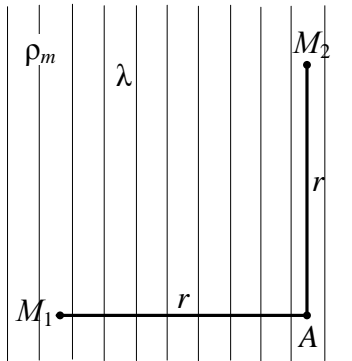


Рис. 6.3. К пояснению принципа определения λ_k крестообразной установкой

Чтобы определить λ_k и направление простирания слоистости, надо, как при круговом профилировании, выполнить измерения при двух ориентировках установки, отличающихся на угол ψ . Рассмотренная установка также обладает высокой чувствительностью к неоднородностям среды по удельному сопротивлению. Чтобы уменьшить их влияние, добавляют еще два приемных

заземления и измеряют четыре разности потенциалов. Для вычисления λ_k используется среднее значение разности потенциалов:

$$\Delta U_{cp} = (\Delta U_{21} + \Delta U_{23} + \Delta U_{41} + \Delta U_{43})/4.$$

Так как аномалии от неоднородностей для разных пар электродов имеют разные знаки, искажение среднего значения уменьшается. Влияние анизотропии на все разности потенциалов

одинаково. При неизвестном простирании слоистости используют скрещенные крестообразные установки (рис. 6.4).

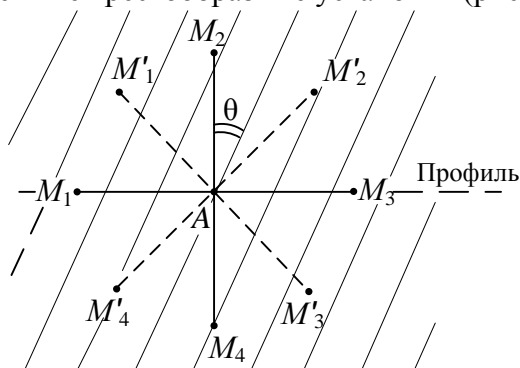


Рис. 6.4. Крестообразная установка для картирования анизотропных пород

При четырех приемных заземлениях кажущееся сопротивление можно измерять с той же установкой. Если сделать питающим заземление M_1 , а заземления A и M_3 приемными, получится трехэлектродная установка с точкой записи посередине между электродами A и M_3 . При питающем заземлении M_3 и приемных электродах A M_1 получится встречная трехэлектродная установка с точкой записи между заземлениями M_1 и A . Так как результаты измерений с трехэлектродной установкой зависят от ее ориентировки, для вычисления λ_k целесообразно использовать среднее значение из результатов измерения ρ_k встречными установками. Измеренные встречными установками кажущиеся сопротивления позволяют построить два графика ρ_k , соответствующих графикам ρ_k комбинированного профилирования.

Если направление профиля (линия M_1AM_3) отклоняется от нормали к простиранию слоистости меньше, чем на 45° , при измерении ρ_k указанными выше установками получаются значения, более близкие к $\rho_{кн}$. Если профиль отклоняется от нормали к простиранию на больший угол, измеряется значение, более близкое к $\rho_{кг}$. При вычислении кажущегося сопротивле-

ния используется соответствующая формула (6.18). Практически используется та формула, по которой $\lambda_{\kappa} > 1$.

Можно использовать для измерения ρ_{κ} и установки с заземлениями M_2AM_4 . Но обычно установки, ориентированные по профилю, дают более информативные графики кажущегося сопротивления.

По чувствительности к неоднородностям среды по удельному сопротивлению крестообразная установка сопоставима со способом прослеживания изолиний потенциала. Производительность труда при работе с этой установкой в несколько раз выше.

Производительность труда с крестообразной установкой можно увеличить на 30-35 %, если избежать поворота установки. При основной ориентировке установки разности потенциалов, измеренные между электродами M_2 и M_4 в поле заземлений M_1 и M_3 ($\Delta U''_{24}$ и $\Delta U''_{42}$), аналогичны измеряемым в повернутой на 45° установке разностям потенциалов $\Delta U'_{23}$ и $\Delta U'_{41}$ соответственно (рис. 6.5). Аналогично $\Delta U''_{13}$ в поле M_2 , и $\Delta U''_{31}$ в поле M_4 соответствуют $\Delta U'_{43}$ и $\Delta U'_{21}$.

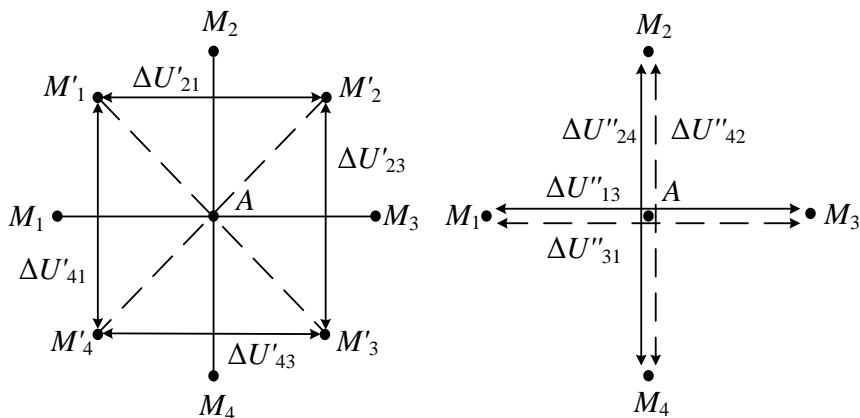


Рис. 6.5. Схема измерений без поворота крестообразной установки

Следует только учитывать, что при работе без поворота установки разности потенциалов $\Delta U''$ измеряются с установкой, имеющей размер $r\sqrt{2}$. Таким образом, при такой методике $\lambda_{к1}$ и $\lambda_{к2}$ измеряются с разными размерами установок, различающимися в $\sqrt{2}$ раз. Поэтому методика может применяться только при малой мощности рыхлых отложений (до $0,1r$). Не следует также применять методику на участках с широким распространением контактов, пересекающих профили под острым углом.

Квадратная установка предложена английским геофизиком Г. М. Хабберьямом (G. M. Habberjam). В этой установке четыре заземления располагаются в углах квадрата со стороной a . Измеряются разности потенциалов ΔU_n между электродами M и N в поле заземлений A и B и ΔU_t между электродами M' и N' в поле заземлений A' и B' (рис. 6.6):

$$\Delta U_n = \frac{I\rho_m}{2\pi} \left(\frac{2}{a} - \frac{2}{\sqrt{a^2\lambda_k^2 + a^2}} \right) = \frac{I\rho_m}{\pi a} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}} \right),$$

$$\Delta U_t = \frac{I\rho_m}{2\pi} \left(\frac{2}{a\lambda_k} - \frac{2}{\sqrt{a^2\lambda_k^2 + a^2}} \right) = \frac{I\rho_m}{\pi a} \left(\frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}} \right).$$

Отношение разностей потенциалов:

$$\frac{\Delta U_n}{\Delta U_t} = \frac{1 - \frac{1}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}}}{\frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{\sqrt{\lambda_k^2 + 1}}}. \quad (6.19)$$

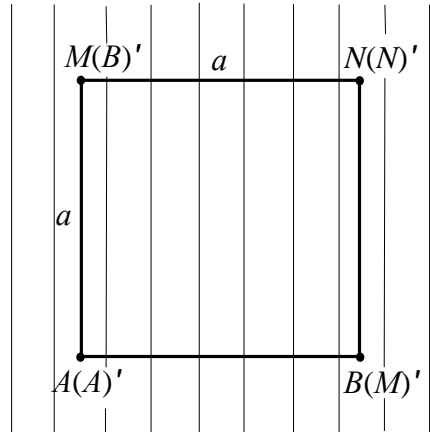


Рис. 6.6. Квадратная установка

Решая это уравнение можно найти кажущийся коэффициент анизотропии. Так как каждый раз решать уравнение четвертой степени нетехнологично, целесообразнее по результатам решения прямой задачи для ряда значений λ_k построить номограмму, представляющую собой зависимость λ_k от отношения разностей потенциалов (рис. 6.7).

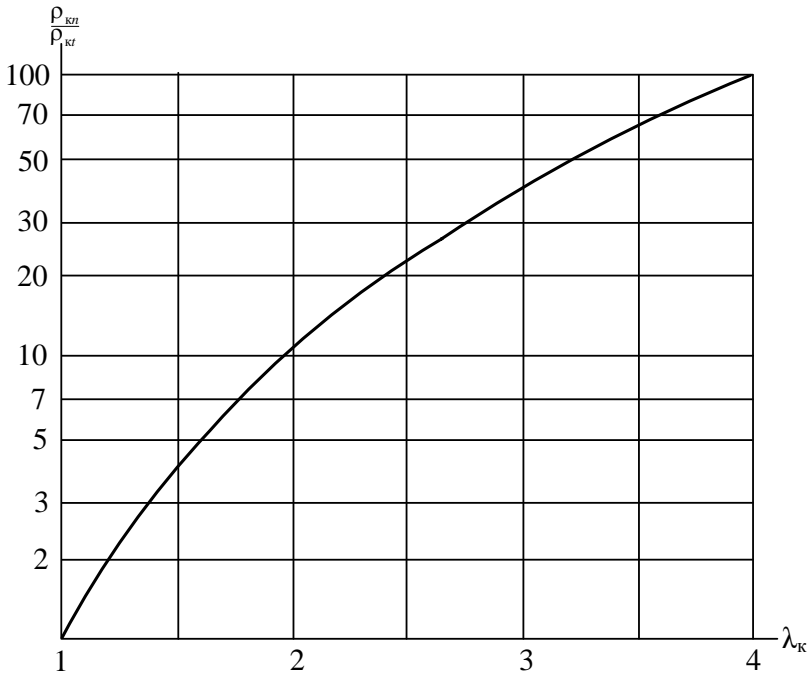


Рис. 6.7. Номограмма для определения λ_k по результатам измерений с квадратной установкой

При неизвестном простирании слоистости, как и в других способах, следует применять скрещенные установки.

Способ достаточно технологичен, но чувствителен к неоднородностям среды по удельному сопротивлению, хотя и в

меньшей степени, чем круговое профилирование с симметричной установкой. Важным свойством квадратной установки является относительно большая глубина исследования. Одна и та же глубина исследования достигается при работе с квадратной и симметричной установками при $a \approx AB/5$. Это позволяет применять квадратные установки меньшего размера и повысить детальность исследований.

В квадратной установке $\Delta U_n/\Delta U_r > \lambda_k$. Это ее свойство позволяет картировать слабоанизотропные породы.

Обработка и интерпретация результатов картирования анизотропных пород. Рассмотрим принципы обработки, интерпретации и изображения результатов картирования анизотропных пород с помощью крестообразной установки. Многие из приемов, разработанных для этой установки, применимы и для других способов, иногда с небольшими изменениями.

Основным способом изображения результатов является построение графиков λ_k и ρ_k . Чтобы показать направление простирания слоистости, в каждой точке строится отрезок, ориентированный в соответствии с полученным значением угла θ . Длина отрезка должна соответствовать величине $\lambda_k - 1$ в том же масштабе, что и график. Будем называть эти отрезки осями наибольшей кажущейся электропроводности γ_k . При площадной съемке оси γ_k строятся на плане расположения точек наблюдений. На плане осей γ_k наглядно отражаются положение и структура зон повышенной анизотропии. Кроме графиков λ_k строятся графики кажущегося сопротивления для встречных трехэлектродных установок, т. е. графики ρ_k комбинированного профилирования.

Затем выполняется полуколичественная интерпретация графиков λ_k . При интерпретации способом подбора выделяются пласты с различными значениями λ_k и определяется положение их контактов. При подборе используется положение, что вклад каждого пласта, характеризующегося кажущимся коэффициентом анизотропии λ_{ki} , пропорционален доле, занимаемой этим пластом в интервале профиля, занятом установкой, т. е. $d_i/2r$.

Если в пределах установки располагается n пластов, измеренный кажущийся коэффициент анизотропии равен:

$$\lambda_{\text{к изм}} = \frac{1}{2r} \sum_{i=1}^n d_i \lambda_{\text{ки}}. \quad (6.20)$$

Выделенные пласты выносятся на план осей $\gamma_{\text{к}}$ и увязываются между собой.

Если на участке выделяются контакты пород, существенно отличающихся по удельному сопротивлению, целесообразно ввести поправку за влияние контактов на величину $\lambda_{\text{к}}$. Влияние контакта наибольшее, когда один из приемных электродов расположен над контактом. При его удалении от контакта искажение быстро уменьшается. Когда известен угол падения слоистости можно при необходимости ввести поправку за наклонное залегание, воспользовавшись формулой (5.41).

Окончательным документом, наиболее наглядно отражающим расположение и структуру зон анизотропных пород, является геоэлектрическая схема. Перед ее составлением производится статистическая обработка. По ее результатам выделяются 2-3 группы пластов, различающихся по $\lambda_{\text{к}}$. Зоны распространения пород, характеризующиеся значениями $\lambda_{\text{к}}$, соответствующими выделенным группам, выносятся на план различной штриховкой. Направление штрихов должно соответствовать направлению простирания слоистости в соответствующих точках. На схеме указываются также контакты пород по удельному сопротивлению, выделенные по графикам $\rho_{\text{к}}$. Пример результатов картирования анизотропных пород приведен на рис. 6.8.

Рассмотренные приемы обработки и интерпретации результатов полностью применимы к способу квадратной установки. При круговом профилировании за размер установки следует принимать длину линии MN , а при прослеживании эквипотенциальных линий – поперечник изолинии потенциала.

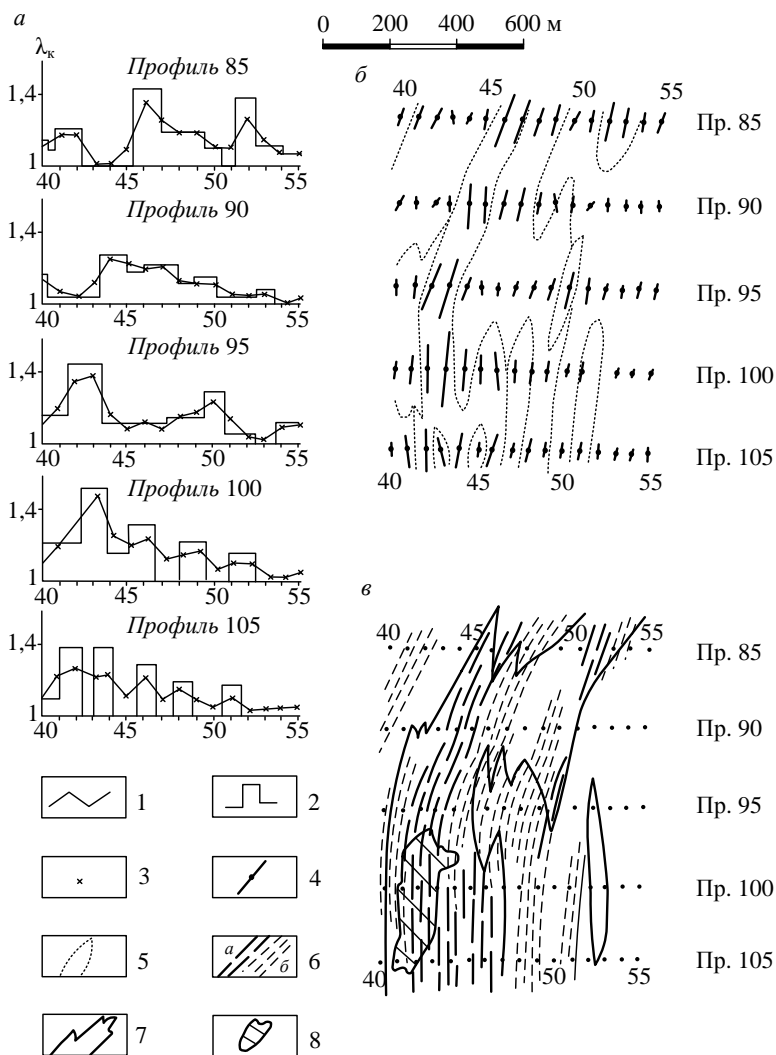


Рис. 6.8. Пример интерпретации результатов картирования анизотропных пород крестообразной установкой (Калугинское месторождение, Нижнетурунинский район):

а – графики λ_k ; *б* – план осей наибольшей кажущейся электропроводности; *в* – геоэлектрическая схема.

1 – графики λ_k ; 2 – интерпретационные графики λ_k ; 3 – значения λ_k , рассчитанные для интерпретационного разреза; 4 – оси наибольшей кажущейся проводимости (длины отрезков пропорциональны $\lambda_k - 1$); 5 – контуры зон с повышенной анизотропией; 6 – зоны с повышенной анизотропией: *а* – $\lambda_k > 1,25$, *б* – $\lambda_k = 1,10 - 1,25$; 7 – контуры метасоматитов по геологическим данным; 8 – контур рудного тела

6.3. Влияние анизотропии пород на результаты методов сопротивлений и заряда

Электрическое поле в анизотропной среде отличается от поля в среде изотропной. Эти различия приводят к изменению вида аномалий. В некоторых случаях они могут маскировать аномалии от изучаемых геологических тел, в других случаях, напротив, иметь вид, сходный с аномальными эффектами от объектов поисков.

Принцип расчета электрического поля в неоднородной анизотропной среде. Расчет электрического поля в анизотропной среде в общем случае весьма сложен. Задача упрощается, если ввести некоторые ограничения, позволяющие использовать способ перехода к эквивалентному изотропному пространству с разномасштабными координатами. Этот способ применим, если оси тензора удельного сопротивления ориентированы одинаково во всем пространстве и соблюдается одно из следующих условий:

- оси тензора удельного сопротивления ориентированы произвольно, но λ и λ_r во всем пространстве одинаковы;
- две оси тензора удельного сопротивления параллельны границам раздела, коэффициент анизотропии в этой плоскости при переходе через границу раздела не меняется.

Соблюдая сформулированные условия, можно с приемлемым приближением моделировать многие практически важные случаи.

Рассмотрим расчет поля в присутствии плоской границы раздела анизотропных пород. Слева от контакта параметры среды ρ_{m1}, λ_1 , справа – ρ_{m2}, λ_2 . Слоистость среды параллельна контакту. Пусть установка AMN располагается слева от контакта (рис. 6.9, а). Размер установки $AO=L$, размер приемной линии $MN=2l$. Увеличив все расстояния в λ_1 раз, получим расположение электродов установки на эквивалентном изотропном разрезе (см. рис. 6.9, б).

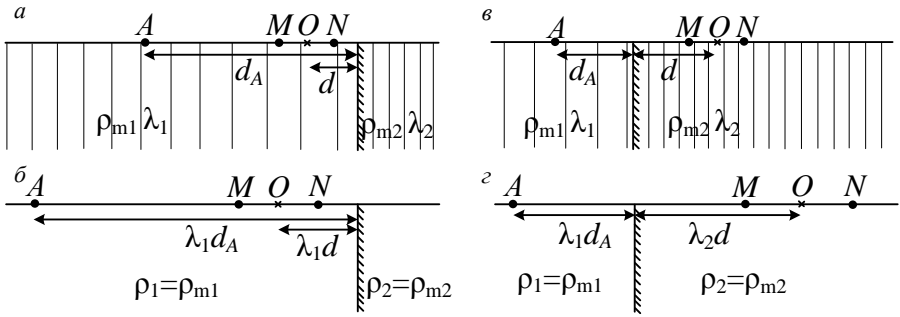


Рис. 6.9. К расчету поля в присутствии контакта анизотропных сред

Теперь можно написать выражение для разности потенциалов:

$$\Delta U = \frac{I\rho_{m1}}{2\pi} \left[\frac{1}{\lambda_1(L-l)} - \frac{1}{\lambda_1(L+l)} + \frac{k_{12}}{\lambda_1(2d_A - L - l)} - \frac{k_{12}}{\lambda_1(2d_A - L + l)} \right] =$$

$$= \frac{I\rho_{m1}}{\pi\lambda_1} \left[\frac{l}{L^2 - l^2} + \frac{k_{12}l}{4d_A(d_A - L) + (L^2 - l^2)} \right]. \quad (6.21)$$

Коэффициент отражения k_{12} в случае анизотропных пород вычисляется через средние геометрические удельные сопротивления.

Случай, когда питающее заземление A располагается слева от контакта, а приемная линия справа, изображен на рис 6.9, в. В этом случае левее контакта расстояния надо увеличивать в λ_1 раз, а правее контакта – в λ_2 раз (см. рис. 6.9, з). Выражение для разности потенциалов в этом случае имеет вид:

$$\Delta U = \frac{I\rho_{m1}}{2\pi} \left[\frac{1+k_{12}}{\lambda_1 d_A + \lambda_2(d-l)} - \frac{1+k_{12}}{\lambda_1 d_A + \lambda_2(d+l)} \right]. \quad (6.22)$$

Аналогично можно написать выражение для разности потенциалов, когда контакт находится между приемными заземлениями. Только тогда потенциал электрода M надо определять как в первом из рассмотренных случаев, а потенциал электрода N – как во втором случае.

Если падение горных пород не вертикальное, вместо истинного коэффициента анизотропии надо использовать λ_k . Только следует иметь в виду, что в этом случае изменяется положение поверхности земли в эквивалентном изотропном пространстве и на контакте появляется ее излом, как показано на рис. 6.10.

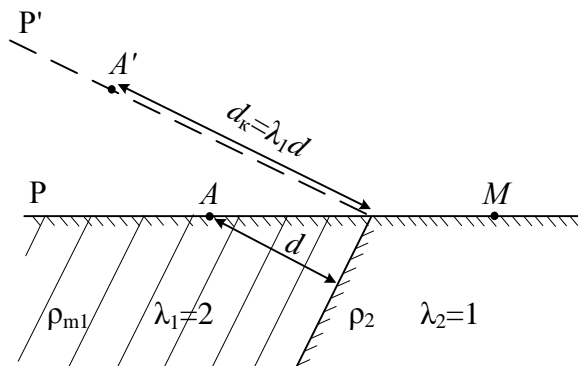


Рис. 6.10. Изменение положения границы раздела "земля – воздух" (P) в эквивалентном изотропном пространстве (P')

При крутых углах падения поворот границы раздела "земля-воздух" в эквивалентном пространстве невелик и в первом приближении им можно пренебречь. Если угол падения пологий, в эквивалентном пространстве надо решать задачу с учетом этого излома границы раздела "земля-воздух". Решение этой задачи можно найти в работе [29].

Влияние анизотропии на результаты электрического зондирования. Рассмотрим зондирование на поверхности двухслойной среды с анизотропным верхним слоем. Слоистость в верхнем слое параллельна границе раздела, т. е. горизонтальна. В этом случае кривая зондирования имеет такую же форму, как в случае изотропного верхнего слоя с удельным сопротивлением $\rho_{1з} = \rho_{m1}$ и $h_{1з} = h_{1к} = \lambda_1 h_1$, т. е. ведет себя так, как будто верхний слой имеет λ_1 раз большую мощность, чем в реальном разрезе (рис. 6.11). При интерпретации такой кривой мощность верхнего слоя будет завышена в λ_1 раз.

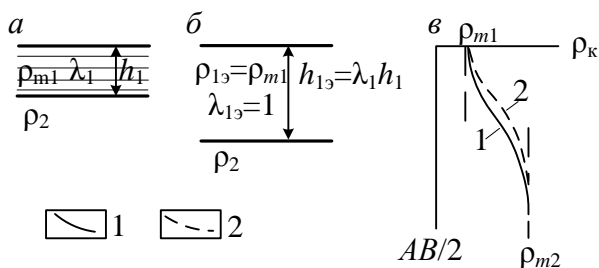


Рис. 6.11. Влияние анизотропии на результаты ВЭЗ в двухслойной среде с анизотропным верхним слоем:
a – реальный разрез; *б* – эквивалентный разрез; *в* – кривые ВЭЗ
 1 – кривая ВЭЗ для реального разреза с параметрами $\rho_{m1}, \lambda_1, h_1$; 2 – то же для разреза с изотропным верхним слоем с параметрами $\rho_1=\rho_{m1}, \lambda_1=1, h_1$

Аналогичная картина наблюдается, когда в многослойных разрезах анизотропны промежуточные слои. Например, в изображенном на рис. 6.12 трехслойном разрезе с анизотропным средним слоем, кривая зондирования ведет себя так, как будто этот слой имеет мощность $h_{23} = h_{2к} = \lambda_2 h_2$. Соответственно при интерпретации будет получена мощность промежуточного слоя в λ_2 раз превышающая истинную его мощность.

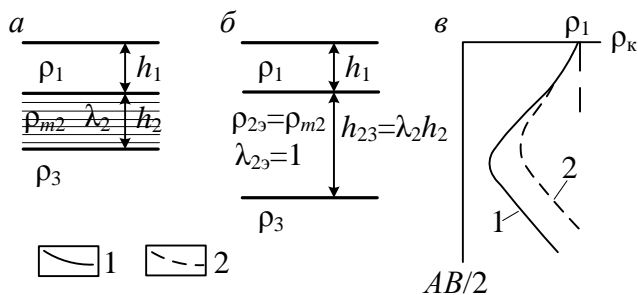


Рис. 6.12. Влияние анизотропии на результаты ВЭЗ в трехслойной среде с анизотропным средним слоем:
a – реальный разрез; *б* – эквивалентный разрез; *в* – кривые ВЭЗ
 1 – кривая ВЭЗ для реального разреза с параметрами $\rho_{m2}, \lambda_2, h_2$; 2 – то же для разреза с изотропным верхним слоем с параметрами $\rho_2=\rho_{m2}, \lambda_2=1, h_2$

Чтобы найти истинные мощности слоев надо полученные при интерпретации значения мощностей разделить на ко-

эффиценты анизотропии этих слоев. Для оценки коэффициентов анизотропии необходимо в отдельных точках знать истинные мощности слоев и в этих точках выполнить зондирования. Тогда коэффициент любого слоя можно вычислить по формуле:

$$\lambda_i = \frac{h_{\text{интерпр.}}}{h_{\text{истин.}}} \quad (6.23)$$

Наиболее надежно истинные мощности слоев можно определить, если на участке есть скважины, и в них выполнен каротаж КС. Можно использовать сейсмические данные, если есть уверенность в совпадении электрических и сейсмических границ раздела. В крайнем случае, можно воспользоваться методом аналогий, приняв коэффициенты анизотропии такими же, как у аналогичных горных пород в других районах.

Слоистость (сланцеватость) не всегда параллельна границам раздела. Например, в рудных районах часто встречаются крутопадающие зоны рассланцевания. При этом нередко коэффициент анизотропии коры выветривания мало отличается от коэффициента анизотропии свежих пород. В этом случае, если мощность рыхлых образований невелика, среду можно считать двухслойной с одинаковой анизотропией слоев. Над таким раз-

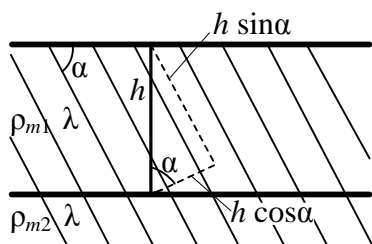


Рис. 6.13. К оценке влияния анизотропии при наклонной слоистости на получаемую при интерпретации мощность слоя

резом при ориентировке установки по простиранию слоев начальная и конечная асимптоты кривой зондирования соответствуют средним геометрическим удельным сопротивлениям слоев ρ_{m1} и ρ_{m2} . Но при интерпретации истинная мощность верхнего слоя будет получена только в случае вертикальной слоистости. При наклонном залегании будет

получена кажущаяся мощность, равная, как следует из рис. 6.13,

$$h_k = \sqrt{h_1^2 \sin^2 \alpha + \lambda^2 h_1^2 \cos^2 \alpha} = h_1 \sqrt{1 + (\lambda^2 - 1) \cos^2 \alpha}. \quad (6.24)$$

Таким образом, отличие полученной при интерпретации кажущейся мощности от истинной зависит от угла падения и коэффициента анизотропии.

При ориентировке установки вкрест простирания слоистости ее эффективный (кажущийся) размер L_k больше истинного в λ_k раз. Поэтому нижний слой начинает оказывать влияние на величину ρ_k при меньших разносах $AB/2$, чем в случае изотропного верхнего слоя (рис. 6.14). При интерпретации будет получена кажущаяся мощность, меньшая истинной.

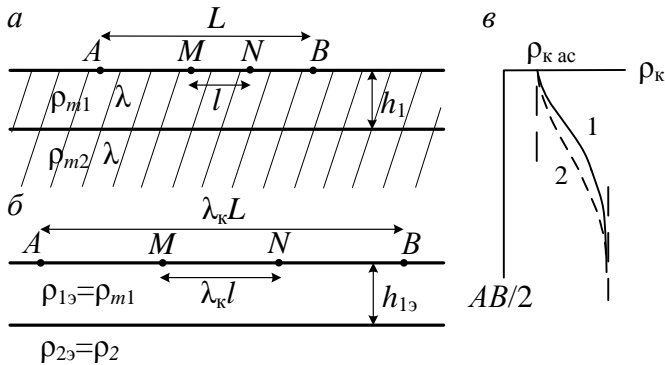


Рис. 6.14. Влияние анизотропии на результаты ВЭЗ в среде с крутым падением слоистости:

a – реальный разрез; *б* – эквивалентный разрез; *в* – кривые ВЭЗ

1 – кривая ВЭЗ для реального разреза; 2 – то же для изотропного разреза

В случае вертикального падения занижение h_1 будет в λ раз, при крутом падении приблизительно в λ_k раз. При пологом падении будет еще искажение мощности, определяемое выражением (6.24). Асимптотические значения ρ_k при ориентировке установки вкрест простирания слоистости равны $\rho_{m1} \lambda_k$ и $\rho_{m2} \lambda_k$.

При произвольной ориентировке под углом θ к простиранию кажущийся размер установки определяется выражением:

$$L_k = \sqrt{L^2 \cos^2 \theta + \lambda_k^2 L^2 \sin^2 \theta} = L \sqrt{1 + (\lambda_k^2 - 1) \sin^2 \theta}. \quad (6.25)$$

Кривые зондирования, полученные над анизотропными разрезами с негоризонтальной слоистостью, целесообразно строить, как графики зависимости ρ_k от кажущегося, а не от истинного размера установки.

Приведенные выше формулы написаны для одноосной среды. Их не сложно обобщить для трехосной анизотропии, если все кажущиеся расстояния определять по формуле (5.27).

Большой интерес представляет случай, когда анизотропные крутопадающие породы перекрыты проводящим изотропным слоем рыхлых отложений. Поведение электрического поля над таким разрезом впервые было экспериментально изучено В. Н. Дахновым [30]. В поле точечного источника изолинии потенциала с радиусом, меньшим мощности верхнего изотропного слоя h_1 , имеют форму окружности. При увеличении размера изолиний возрастает глубина проникновения тока, и линии равного потенциала принимают форму эллипсов, ориентированных вкрест простирания слоистости (рис. 6.15). Необычную ориентировку изолиний можно объяснить тем, что по направлению простирания пород ток распространяется вглубь по слоистости подстилающих пород, и на поверхности земли плотность тока относительно невелика. По направлению вкрест простирания ток как бы скользит вдоль поверхности нижнего слоя, имеющего в этом направлении большое сопротивление (ρ_n). Поэтому на одном и том же расстоянии от источника потенциал по направлению вкрест простирания слоистости больше, чем по направлению простирания.

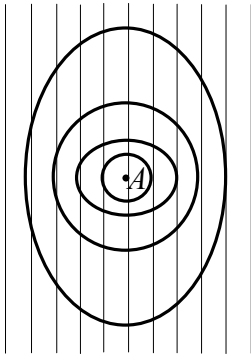


Рис. 6.15. Изменение формы изолиний потенциала на поверхности анизотропной среды с изотропным верхним слоем в зависимости от расстояния до точечного источника (по В. Н. Дахнову)

При дальнейшем увеличении размера линий равного потенциала снова появляется изолиния, имеющая форму окружности, а затем эквипотенциальные линии становятся эллипсами, ориентированными по простиранию пород. При достаточном размере линий равного потенциала отношение их осей стремится к кажущемуся коэффициенту анизотропии нижнего слоя. Так же, как изолинии потенциала, меняются полярные диаграммы ρ_k при изменении размеров установки.

Используя рассмотренные особенности поля над анизотропной средой, перекрытой проводящим изотропным слоем, можно представить вид кривых зондирования. При ориентировке установки по простиранию пород ($\theta=0$) асимптотами кривой являются удельное сопротивление верхнего слоя ρ_1 и среднее геометрическое удельное сопротивление подстилающей среды ρ_{m2} . Форма кривой ρ_{kt} такая же, как над изотропным разрезом, только влияние нижнего слоя начинается при несколько большем размере установки (рис. 6.16). При интерпретации такой кривой мощность верхнего слоя определяется с погрешностью (завышается).

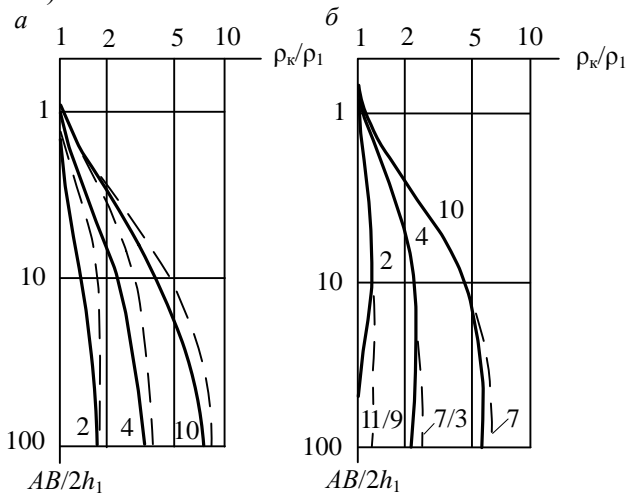


Рис. 6.16. Кривые зондирования над анизотропными породами ($\lambda=2$, $\alpha=90^\circ$), перекрытыми изотропным проводящим слоем (по С. С. Сыскову):

a – установка ориентирована по простиранию пород; *b* – установка ориентирована вкrest простирания пород. Штриховые линии – кривые зондирования в изотропной двухслойной среде. Параметр кривых – ρ_{m2}/ρ_1

В случае ориентировки установки вкrest простираия пород кривая $\rho_{кн}$ сначала практически совпадает с кривой над изотропным разрезом. Затем наблюдается максимум, в котором кажущееся сопротивление превышает ρ_{i2} . При дальнейшем увеличении размеров установки $\rho_{к}$ уменьшается и стремится к асимптотическому значению, равному ρ_{i2} (см. рис. 6.16). При интерпретации такая кривая зондирования может быть ошибочно принята за трехслойную кривую типа *K*. По начальной части кривой может быть с удовлетворительной точностью определена мощность верхнего слоя.

Влияние анизотропии на результаты электропрофиллирования. Рассмотрим профилирование через вертикальный анизотропный пласт с установкой срединного градиента. В средней части установки первичное поле можно считать однородным. Если установка ориентирована вкrest простираия пласта, он не изменяет растекания тока. Поэтому плотность тока j_{MN} как вне пласта, так и внутри его одинакова и равна нормальной плотности тока j_0 . Внутри пласта кажущееся сопротивление равно $\rho_{к2} = \rho_{MN} \frac{j_{MN}}{j_0} = \rho_{MN} = \rho_{n2}$. Во вмещающей среде, если она изотропна, $\rho_{к} = \rho_1$, а если анизотропна, $\rho_{к} = \rho_{n1}$. При переходе

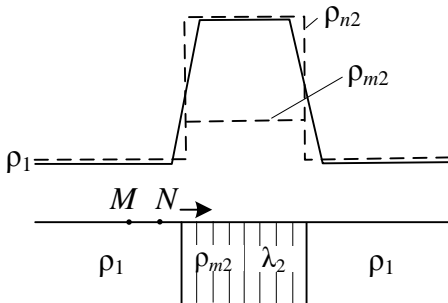


Рис. 6.17. График $\rho_{к}$ срединного градиента над анизотропным пластом ($\lambda_2=2$)

приемной линии через контакты пласта $\rho_{к}$ изменяется от ρ_{n1} до ρ_{n2} (рис. 6.17). Следовательно, знак и амплитуда аномалии зависят от соотношения ρ_{n2} и ρ_{n1} . Если поперечное сопротивление пласта не отличается от сопротивления среды, аномалия от пласта в установке срединного градиента отсутствует.

Если установка, имеющая размер значительно меньший мощности пласта, расположена внутри пласта и ориентирована вкрест его простирания, ρ_k равно продольному удельному сопротивлению пласта. Таким образом, в зависимости от соотношения между размером установки и мощностью пласта, ρ_k над пластом может изменяться от продольного до поперечного удельного сопротивления пласта. Если $\rho_{f2} < \rho_1$, а $\rho_{n2} > \rho_1$ (или $\rho_{f2} > \rho_1$, а $\rho_{n2} < \rho_1$), то при изменении размера установки может измениться знак аномалии ρ_k . В первом из двух названных случаев при малых размерах установки пласт вызовет минимум, а при больших размерах установки – максимум ρ_k . Во втором случае соотношение между ρ_k для большой и малой установок будет противоположным первому случаю.

Рассмотренные особенности поведения кажущегося сопротивления сохраняются и в случае, когда пласт имеет не вертикальное, но достаточно крутое падение.

При профилировании с установкой, ориентированной по простиранию пласта, графики ρ_k не отличаются от графиков над изотропным пластом с удельным сопротивлением ρ_{m2} .

Зависимость кажущегося сопротивления над анизотропным пластом от размера установки приводит к тому, что при зондировании над пластом с установкой, ориентированной вкрест его простирания, кривые имеют облик двухслойных.

При переходе через пласт питающих электродов наблюдаются экранные эффекты, осложняющие графики ρ_k . Рассмотрим профилирование через анизотропный пласт для наиболее часто встречающегося в практике случая, когда разнос AB больше, а разнос MN меньше мощности пласта. Для вывода вида графиков ρ_k воспользуемся способом приближенного их построения [1, часть 1].

Пусть среднее квадратичное удельное сопротивление ρ_{m2} анизотропного пласта больше удельного сопротивления вмещающей среды. Когда установка AMN располагается во вмещающей среде, вид графиков ρ_k не отличается от случая изотропного пласта. При приближении к пласту ρ_k уменьшается, достигая минимума, когда электрод N располагается на ле-

вом контакте пласта (рис. 6.18, *a*). При входе приемной линии в пласт кажущееся сопротивление растет из-за увеличения ρ_{MN} от ρ_1 до ρ_{n2} и может превысить ρ_{m2} , но не достигает величины ρ_{n2} . По мере перемещения приемной линии по пласту между ней и питающим электродом включается участок пласта. Это приводит к увеличению кажущегося размера установки и уменьшению ρ_k . После выхода приемной линии из пласта график ведет себя так же, как в случае изотропного пласта высокого сопротивления, только площадка равных сопротивлений располагается на более низком уровне.

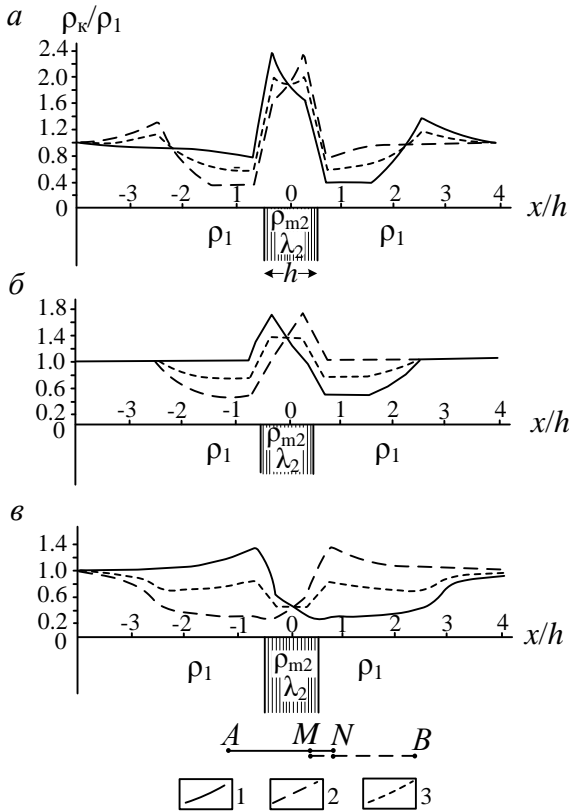


Рис. 6.18. График ρ_k над анизотропными пластами ($\lambda_2=2$):

a – $\rho_{m2} = 2\rho_1$; *b* – $\rho_{m2} = \rho_1$; *c* – $\rho_{m2} = \rho_1/4$.

1 – графики ρ_k для установки *AMN*; 2 – то же для установки *MNB*; 3 – то же для установки СЭП

Для установки MNB внутри пласта кажущееся сопротивление при перемещении приемной линии слева направо увеличивается, т. е. изменяется в противоположном, по сравнению с ρ_k , для установки AMN направлении. Это приводит к появлению над анизотропным пластом высокого сопротивления прямого пересечения графиков ρ_k , в отличие от случая изотропного высокоомного пласта, над которым пересечение обратное. Уровень, на котором пересекаются графики ρ_k , зависит от соотношения между размером установки и мощностью пласта (увеличивается при увеличении размера установки).

При профилировании с симметричной установкой график ρ_k над анизотропным пластом качественно не отличается от графика над изотропным пластом такого же сопротивления.

При $\rho_{m2}=\rho_1$ график ρ_k СЭП ведет себя, как над изотропным пластом повышенного сопротивления (см. рис. 6.18, б). Аномалию комбинированного профилирования в этом случае легко принять за аномалию от хорошо проводящего объекта – над пластом наблюдается отчетливое пересечение графиков на несколько повышенном уровне.

Графики ρ_k над проводящим анизотропным пластом ($\rho_{m2}<\rho_1$) качественно не отличаются от графиков над изотропным пластом (см. рис. 6.18, в). Заметим только, что если продольное удельное сопротивление пласта близко к сопротивлению вмещающей среды, аномалии в симметричном профилировании не наблюдается.

Таким образом, наиболее сильное влияние анизотропия оказывает на графики ρ_k при профилировании несимметричными установками (трехэлектродная и дипольная) над анизотропными пластами высокого сопротивления.

Сильное влияния оказывает анизотропия при профилировании через контакт, когда более анизотропные породы имеют более высокое сопротивление. В этом случае существенно искажаются и графики ρ_k симметричного профилирования.

На рис. 6.19, а приведены графики ρ_k над контактом изотропных и анизотропных пород при $\rho_{m2}=2\rho_1$. Для объяснения вида графиков воспользуемся приближенным способом их по-

строения. При приближении установки AMN к контакту плотность тока j_{MN} убывает и кажущееся сопротивление уменьшается, достигая минимума при расположении электрода N на контакте. При переходе через контакт линии MN сопротивление ρ_{MN} увеличивается от ρ_1 до ρ_{n2} , при этом наблюдается быстрый рост кажущегося сопротивления, и когда электрод M встает на контакт, оно принимает максимальное значение, промежуточное между ρ_{m2} и ρ_{n2} . При дальнейшем перемещении установки ρ_k уменьшается, так как между питающим электродом и приемной линией включается участок анизотропных пород, что приводит к увеличению эффективного размера установки. В конце этого участка ρ_k становится меньше продольного сопротивления анизотропных пород. После минимума ρ_k постепенно растет, так как уменьшается влияние более проводящих пород слева от контакта, и выходит на значение ρ_t .

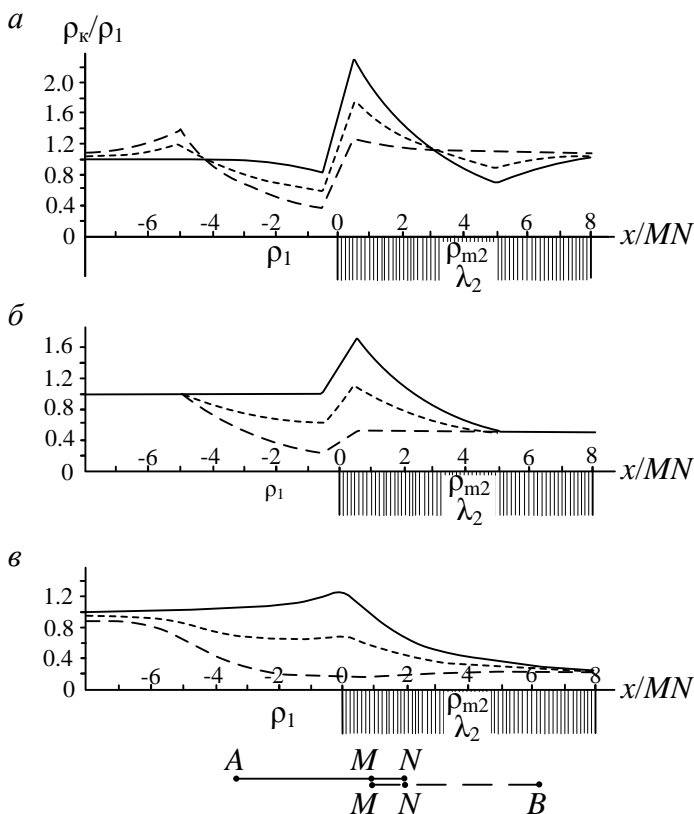


Рис. 6.19. График ρ_k над контактом изотропных и анизотропных пород ($\lambda_2=2$):

$a - \rho_{m2} = 2\rho_1$; $б - \rho_{m2} = \rho_1$; $в - \rho_{m2} = \rho_1/2$. Другие пояснения см. на рис. 6.18

Кажущееся сопротивление для установки MNB при приближении к контакту несколько растет, достигая максимума при расположении электрода B на контакте (экранный эффект). После этого ρ_k убывает, так как питающий электрод входит в изотропные породы и эффективный размер установки увеличивается. При переходе приемной линии через контакт растет ρ_{MN} , и кажущееся сопротивление увеличивается, превышая в конце этого участка величину ρ_t . При дальнейшем перемещении установки ρ_k стремится к уровню ρ_t .

График ρ_k для симметричной установки находится, как среднее арифметическое для кажущихся сопротивлений встречных трехэлектродных установок (см. рис. 6.19, а).

При формальной интерпретации по графикам комбинированного профилирования, по отчетливому прямому пересечению, над анизотропными породами на расстоянии размера установки от контакта будет выделен проводящий объект. По графику СЭП, скорее всего возле контакта со стороны анизотропных пород, будет выделен пласт высокого сопротивления.

При уменьшении удельного сопротивления анизотропных пород амплитуда искажений становится меньше, но характер графиков остается прежним (см. рис. 6.19, б). Он сохраняется до тех пор, пока ρ_{n2} не уменьшится до ρ_1 .

Когда более анизотропные породы имеют меньшее сопротивление, графики ρ_k принципиально не отличаются от графиков над контактом изотропных пород (см. рис. 6.19, в).

Анизотропия вмещающих пород может оказывать существенное влияние на аномалии, вызванные локальными объектами, вплоть до полной их маскировки. Пример такого случая будет рассмотрен ниже.

Влияние анизотропии на результаты метода заряда. В анизотропной среде нормальное электрическое поле заряда отличается от поля в изотропных породах. Этот вопрос был подробно рассмотрен в предыдущих разделах. Смещение эпицентра заряда по направлению простирания пород в трехосной анизотропной среде легко принять за аномалию от хорошо проводящего объекта, вблизи выклинка которого сделан заряд. В практике рудной электроразведки известно немало таких случаев. Их анализ и привел к выводу о широком распространении трехосной анизотропии, которая до этого представлялась геологически маловероятной [38].

В других случаях влияние анизотропии может маскировать аномалии, вызванные локальными проводящими телами. Чаще всего это бывает, когда объект располагается кулисно по отношению к заряду, и направление изолиний над объектом близко к его простиранию.

Конкретные примеры влияния анизотропии на результаты метода заряда будут рассмотрены в следующем разделе.

6.4. Оценка и учет влияния анизотропии пород на результаты методов сопротивлений и заряда

В результате влияния анизотропии на электрическое поле могут появиться искажения, сходные с аномалиями от различных объектов, либо напротив, аномалии от этих объектов могут быть замаскированы. Чтобы избежать ошибок при интерпретации нужна хотя бы приближенная количественная оценка влияния анизотропии. Выполнив такую оценку, интерпретатор может принять решение о необходимости учета влияния анизотропии или о возможности пренебрежения этим влиянием.

Рассмотрим разность потенциалов между приемными электродами M и N в поле питающего заземления A , с которого стекает ток силой I . Расстояния от источника до приемных электродов r_M и r_N . В анизотропной среде

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{\rho_m I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{Mк}} - \frac{1}{r_{Nк}} \right).$$

Способ определения кажущихся расстояний r_k показан на рис. 5.6. В изотропной среде с удельным сопротивлением $\rho = \rho_m$

$$\Delta U_{(\lambda=1)} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right).$$

Степень влияния анизотропии на результаты измерений можно количественно оценить коэффициентом

$$R = \frac{\Delta U_{(\lambda=1)}}{\Delta U} = \frac{1/r_M - 1/r_N}{2\pi} \cdot \frac{2\pi}{1/r_{Mк} - 1/r_{Nк}} = \frac{K}{K_k}. \quad (6.26)$$

где K – коэффициент установки; K_k – кажущийся коэффициент установки, рассчитанный через кажущиеся расстояния.

Используя коэффициент R можно найти исправленное за влияние анизотропии значение разности потенциалов:

$$\Delta U_{\text{испр}} = R \cdot \Delta U = \frac{K}{K} \Delta U. \quad (6.27)$$

Последнее выражение справедливо и для потенциала, и для кажущегося сопротивления, так как потенциал – это разность потенциалов при $r_N \rightarrow \infty$, а кажущееся сопротивление пропорционально ΔU или U .

Описанным способом учитывается влияние анизотропии на нормальную составляющую электрического поля. Аномальная компонента при этом в той или иной степени искажается:

$$\Delta U_{\text{испр}} = R \cdot \Delta U_0 + R \cdot \Delta U_a = \Delta U_{0(\lambda=1)} + R \cdot \Delta U_a. \quad (6.28)$$

Этим определяются ограничения для применения способа. Им можно пользоваться, если поправочный коэффициент R не очень сильно (не более, чем в 2-3 раза) отличается от единицы.

Если R отличается от единицы более чем в 2-3 раза, аномальная компонента поля может существенно искажаться. В этом случае разумнее рассчитывать нормальное поле для анизотропной среды и, сопоставляя с ним результаты измерений, выделять аномалии.

Рассмотрим несколько примеров учета влияния анизотропии среды на результаты электроразведочных измерений. На рис. 6.20 приведены кривые ВЭЗ, полученные при ориентировке установки вкрест простирания пород на участке, сложенном анизотропными породами (Первоуральский район). При этом коэффициент анизотропии по профилю изменяется в широких пределах. Над полосами кварцевохлоритосерицитовых сланцев λ_k достигает 3 единиц на фоне рассланцованных эффузивов с $\lambda_k=1,3-1,5$ (см. рис. 6.20, *a*). При переходе питающих электродов через полосы пород с высокой анизотропией, из-за изменения эффективного размера установки на кривых зондирования наблюдаются резкие искажения.

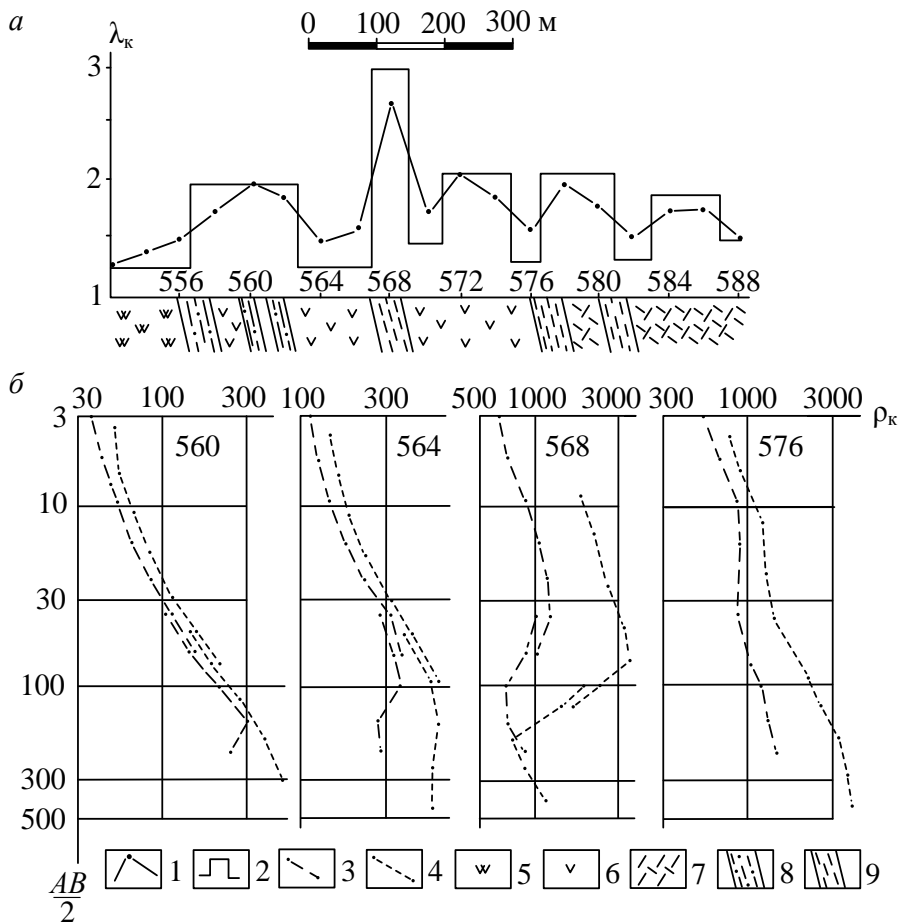


Рис. 6.20. Пример учета влияния анизотропии на результаты ВЭЗ:

a – результаты определения с крестообразной установкой ($r=50$ м); *b* – кривые ВЭЗ: 1 – измеренный график λ_k ; 2 – интерпретационный график λ_k ; 3 – кривые ВЭЗ; 4 – кривые ВЭЗ, исправленные за влияние анизотропии; 5 – серпентиниты; 6 – порфириты и туфы; 7 – альбитофиры; 8 – углистые сланцы; 9 – сланцы кварцевохлоритосерицитовые

Например, на пикете 560 сначала в пределах установки коэффициент анизотропии меняется мало, поэтому форма кривой ВЭЗ практически не искажается. После введения поправки наблюдается только общее увеличение значений ρ_k . При разности $AB/2 \approx 170$ м восточный питающий электрод достигает пласта с λ_k порядка трех единиц, а затем переходит через него. Поэтому последнее значение ρ_k резко занижено и на кривой наблюда-

ется излом. После введения поправки этот излом пропал (см. рис. 6.20, б). Аналогично ведет себя кривая на пикете 564. Но так как на этом пикете питающий электрод достигает пласта с высокой анизотропией при АВ/2 порядка 70 м, занижение значений ρ_k начинается раньше. После введения поправки это искажение также исчезает.

Занижение кажущихся сопротивлений на пикете 568 вызвано тем, что вначале вся установка располагается внутри пласта с высокой анизотропией (измеряется практически ρ_t). После введения поправки кажущееся сопротивление в начальной части кривой увеличивается, и на этом фоне отчетливее проявляется понижение ρ_k на последних разносах, вызванное вкрапленным оруденением Рябининского рудопроявления.

На пикете 576 установка все время располагается в пределах интервала профиля с мало меняющейся анизотропией. Поэтому форма кривой искажается мало, изменяется лишь общий уровень кажущегося сопротивления.

Приведенный пример показывает, что часто встречающиеся при зондировании на участках с крутым падением анизотропных пород резкие искажения кривых могут быть вызваны колебаниями коэффициента анизотропии. Эти искажения могут быть устранены путем введения поправки за влияние анизотропии. По исправленным кривым лучше определяются параметры верхних слоев разреза. На них отчетливее проявляются аномалии от более глубоко залегающих объектов.

Пример учета влияния анизотропии на результаты электропрофилирования приведен на рис. 6.21, на графиках ρ_k комбинированного профилирования, приведенных на рис. 6.21, а в

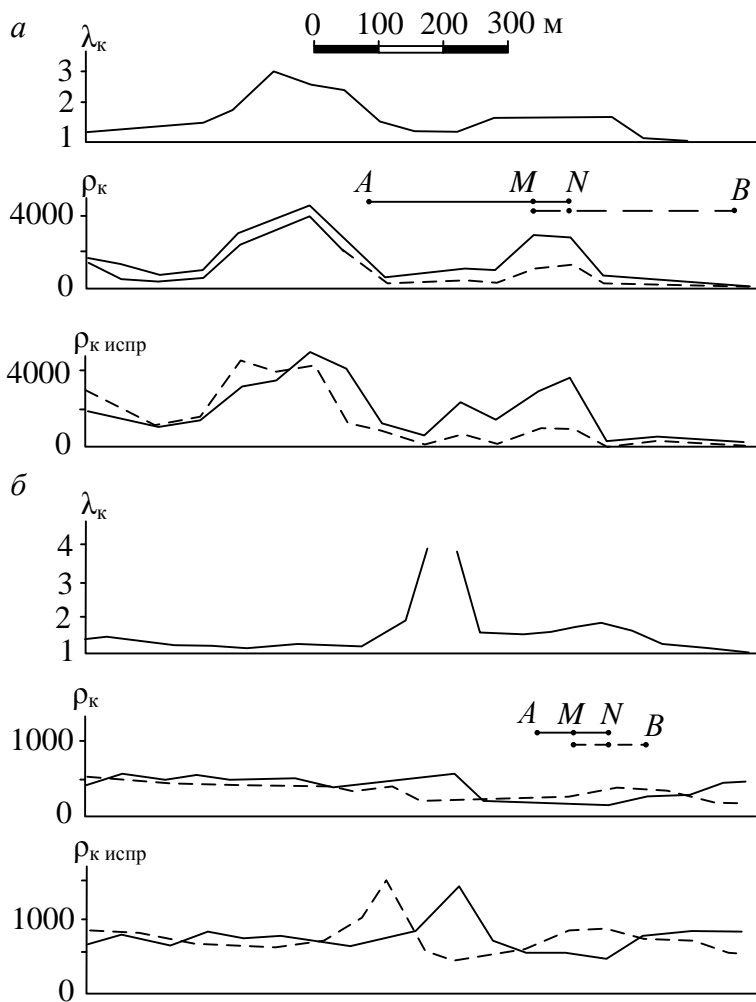


Рис. 6.21. Примеры учета влияния анизотропии на результаты комбинированного профиля

повышения кажущегося сопротивления, но графики ρ_k встречных установок практически совпадают. Такие аномалии характерны для приповерхностных неоднородностей. При картировании с крестообразной установкой этой аномалии соответствует анизотропный пласт. После введения поправки за влияние

анизотропии аномалия приобрела вид, типичный для плохо проводящего пласта – четкое обратное пересечение графиков ρ_k встречных установок при высоких значениях кажущегося сопротивления.

Подобная аномалия на измеренных графиках ρ_k наблюдается в восточной половине профиля. После введения поправки за анизотропию здесь появилась аномалия, характерная для контакта (см. рис. 6.21, а).

В средней части профиля, приведенного на рис. 6.21, б, на фоне спокойного поля наблюдается слабая аномалия типа контакта. После учета влияния анизотропии на этом месте появилась четкая аномалия, соответствующая мощному пласту повышенного сопротивления. Аномалия, соответствующая пласту, наблюдается и на исправленном графике симметричного профилирования (график среднего значения ρ_k встречных установок). На первичных графиках СЭП аномалия отсутствует.

На теоретических графиках ρ_k комбинированного профилирования над проводящим диском в контакте изотропных и анизотропных пород, приведенных на рис. 6.22, а, аномалии от диска не наблюдается. Слабое прямое пересечение графиков наблюдается над анизотропными породами на расстоянии от диска примерно в полтора раза меньшем размера установки. После введения поправки за влияние анизотропии графики приобрели форму, характерную для локального хорошо проводящего объекта (см. рис. 6.22, б).

На этом же рисунке справа приведены результаты наблюдений над разрезом, который в первом приближении можно аппроксимировать рассмотренной выше моделью. В западной части профиля коэффициент анизотропии близок к единице, затем он увеличивается до 1,4 и в восточной части профиля остается постоянным (см. рис. 6.22, в). Вблизи контакта в анизотропных породах при проверке аномалии метода вертикального поля бурением установлено несколько мелких прожилкововкрапленных рудных тел (см. рис. 6.22, д). На графиках ρ_k КЭП они не отмечаются, но на некотором расстоянии со стороны анизотропных пород наблюдается нечеткое прямое

пересечение (см. рис. 6.22, *з*). В целом графики качественно похожи на теоретические графики, приведенные на рис. 6.22, *а*. После введения поправки за влияние анизотропии над рудной зоной появилось прямое пересечение графиков, характерное для проводящего объекта (см. рис. 6.22, *д*).

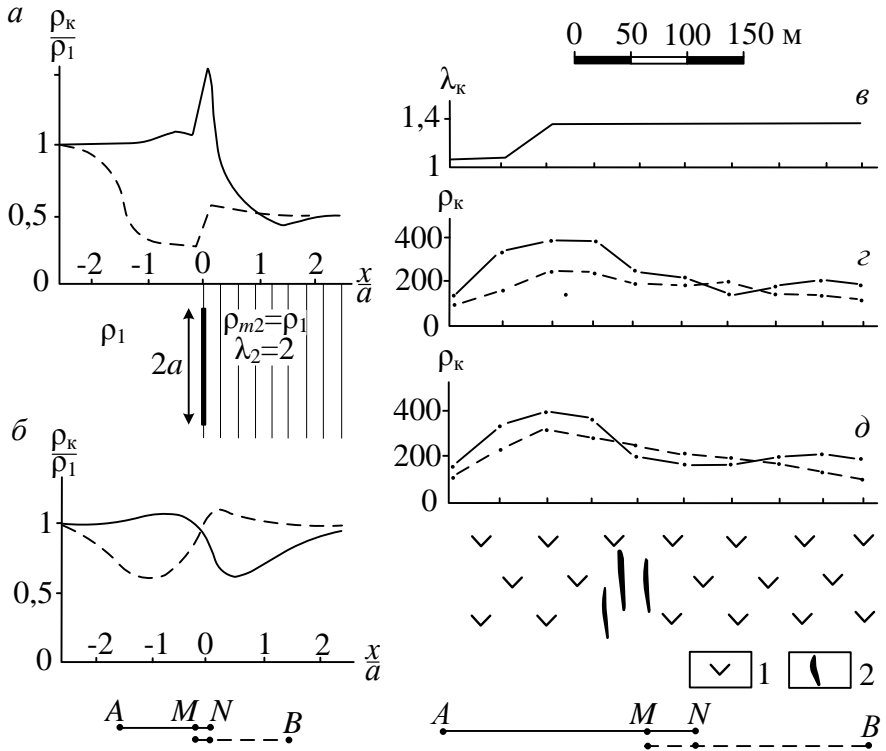


Рис. 6.22. Влияние анизотропии на аномалию от локального объекта: *а* – теоретические графики ρ_k комбинированного профилирования над проводящим диском в контакте изотропных и анизотропных пород; *б* – то же с учетом влияния анизотропии; *в* – график λ_k , измеренный с крестообразной установкой ($r=50$ м); *з* – графики ρ_k комбинированного профилирования ($AO=OB=200$ м, $MN=40$ м); *д* – то же с учетом влияния анизотропии. 1 – порфириты; 2 – прожилково-вкрапленные руды

Существенное и различное по характеру влияние анизотропия может оказывать на результаты метода заряда. В зависимости от условий, ее влияние может выражаться в одних случаях в маскировке аномалий от локальных объектов, в других

случаях – в изменении положения и вида аномалий, в третьих случаях – в появлении "ложных" аномалий на участках, сложенных однородными породами.

Пример маскировки влиянием анизотропии аномалии от локального объекта приведен на рис. 6.23.

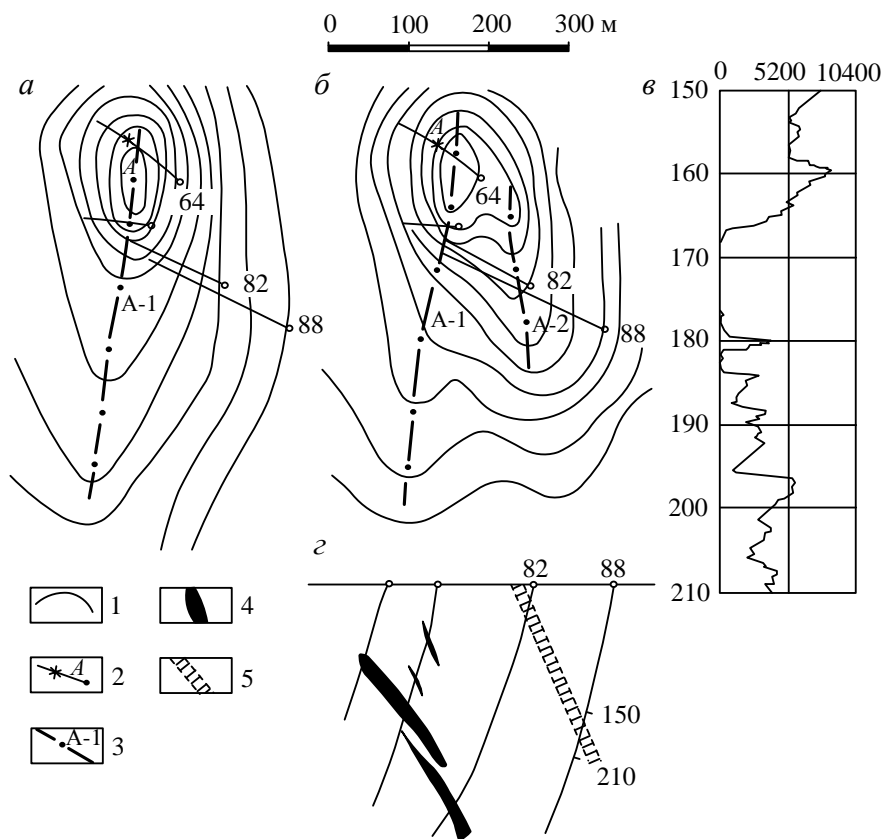


Рис. 6.23. Пример учета влияния анизотропии на результаты метода заряда (Чусовское месторождение):

а – план изолиний потенциала при заряде в скв. 64, $H=184$ м (по С. А. Костромкину); *б* – то же, исправленный за влияние анизотропии ($\lambda_2=2$, $\alpha=65^\circ$); *в* – фрагмент диаграммы КС по скв. 88; *г* – схематический разрез.

1 – изолинии потенциала; 2 – проекции скважин и точка заряда; 3 – оси аномалий; 4 – колчеданные руды; 5 – кремнистоуглистые сланцы

Заряд сделан в скважине 64 на глубине 184 м в северный конец рудного тела Чусовского месторождения. Рудное тело залегает в кварцевохлоритосерицитовых сланцах, характеризующихся коэффициентом анизотропии 2-2,5. Оно имеет длину по простиранию порядка 450 м и погружается к югу под углом около 45°. Эти черты строения месторождения хорошо проявляются на плане изолиний потенциала измеренного поля. Эпицентр заряда смещается к югу. В этом же направлении наблюдается вытянутость изолиний, отражающая влияние погруженной части рудного тела и полосы рудовмещающих сланцев (см. рис. 6.23, *а*). Других аномалий в наблюдаемом поле не выявляется.

На плане изолиний, исправленном за влияние анизотропии, характер аномалии А-1, отражающей положение заряженного рудного тела, существенно не изменился. Но в ста метрах восточнее появилась аномалия А-2 от незаряженного объекта (см. рис. 6.23, *б*). Эта аномалия вызвана линзой проводящих кремнистоуглистых сланцев. На каротажной диаграмме по скважине 88 они отмечаются практически нулевыми сопротивлениями (см. рис. 6.23, *в*). Будучи вынесенной на поверхность земли по восстанию пород, эта проводящая зона точно совпадает с аномалией А-2 (см. рис. 6.23, *б, г*).

Таким образом, в рассмотренном примере влияние анизотропии пород полностью замаскировало аномалию от незаряженного проводящего объекта.

Пример сильного влияния трехосной анизотропии на результаты метода заряда приведен на рис. 6.24. При заряде в рудное подсечение в скважине 2085 центр плана изолиний потенциала располагается в 250 м южнее, у границы планшета. В пределах планшета находится только северная половина центральной изолинии (см. рис. 6.24, *а*). В области проекции заряда наблюдается лишь небольшое искажение, похожее на аномалию от незаряженного объекта. Такой вид поля позволяет полагать, что основная часть заряженного объекта находится южнее скважины и протягивается за пределы планшета.

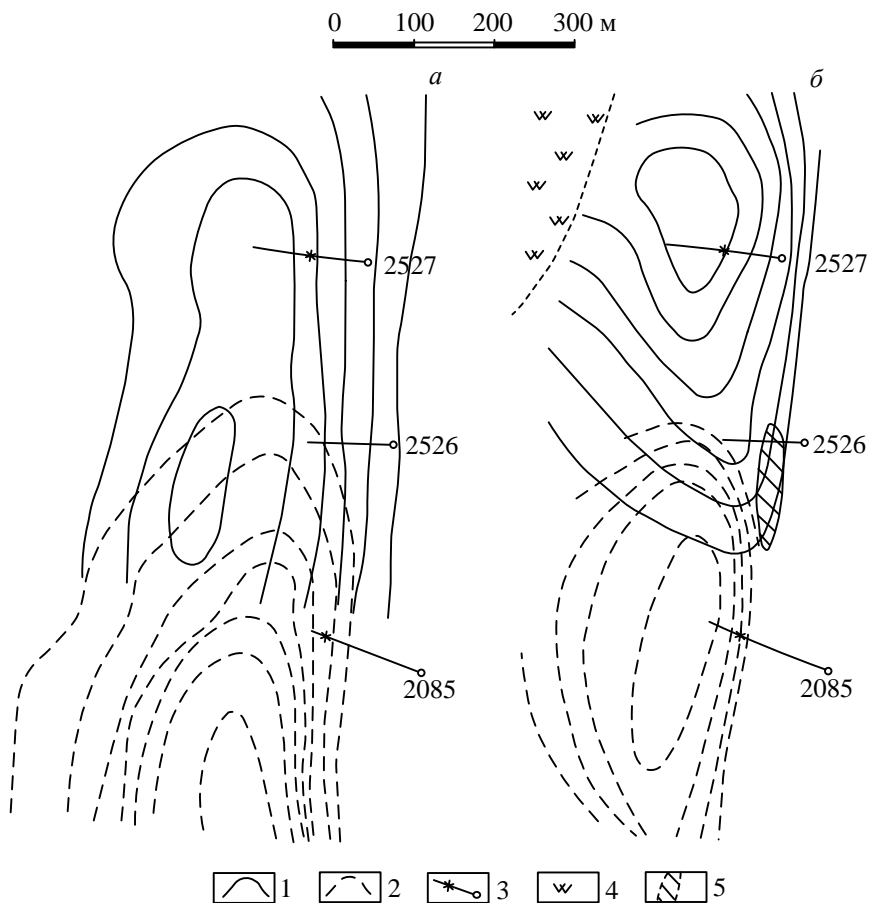


Рис. 6.24. Пример сильного влияния трехосной анизотропии на результаты метода заряда (северный фланг Чусовского месторождения):

а – план изолиний потенциала при зарядах в скв. 2527 и 2085 (по С. А. Костромкину); *б* – то же, исправленный за влияние анизотропии ($\lambda=3,5$, $\lambda_r=2$, $\alpha=65^\circ$, $\beta=30^\circ$).

1 – изолинии при заряде в скв. 2527, $H=300$ м; 2 – то же при заряде в скв. 2085, $H=345$ м; 3 – проекции скважины и точки зарядов; 4 – серпентиниты; 5 – кремнистоуглистые сланцы

После введения поправки за влияние анизотропии центральная часть плана изолиний располагается симметрично по отношению к заряду. У южной кромки планшета аномалия затухла (см. рис. 6.24, *б*). Такой вид плана изолиний потенциала указывает на то, что заряд сделан в центральную часть рудного

тела, имеющего длину порядка 200 м. Этот вывод согласуется с результатами бурения.

При заряде в зону сульфидной вкрапленности в скважине 2527 центр плана изолиний сместился к югу от скважины на расстояние 300 м. Вторая и третья от центра изолинии резко вытянуты на север, в сторону заряда (см. рис. 6.24, *а*). Такой характер поля можно объяснить тем, что заряд располагается вблизи погруженного конца проводящего объекта, который воздымаясь, распространяется к югу по крайней мере на 400-500 м.

После введения поправки за анизотропию эпицентр заряда сместился на север и почти совпал с проекцией источника на поверхность земли. На месте прежнего положения эпицентра электрическое поле нормальное (см. рис. 6.24, *б*). Искажение поля в юго-восточной части планшета в виде вытянутости изолиний вызвано влиянием небольшой линзы кремнистоуглистых сланцев, проявившейся как незаряженный проводник. Искажение поля в северо-западном углу планшета объясняется влиянием более проводящих серпентинитов.

Рассмотренные примеры указывают на целесообразность оценки влияния анизотропии пород на результаты электроразведки и его учета при интерпретации.

6.5. Примеры использования результатов изучения анизотропии горных пород для решения геологических задач

Результаты изучения анизотропии горных пород могут использоваться при решении ряда геологических задач, связанных с геологическим картированием, оценкой перспективности участков, изучением объемного строения рудных полей и месторождений. Методы картирования по коэффициенту анизотропии позволяют не только оконтуривать породы с различной степенью анизотропии, но и изучать внутреннюю структуру анизотропных зон. На фрагменте геоэлектрической схемы участка Калугинского месторождения (Нижне-Туринский район), приведенной на рис. 6.8, *в* видно, что зона повышенной

анизотропии удовлетворительно совпадает с контурами вмещающих рудное тело метасоматитов. Внутри зоны наблюдается дифференциация пород по коэффициенту анизотропии, направление осей наибольшей кажущейся электропроводности отражает структуру рассланцованных пород.

На участке Светлореченского колчеданного месторождения (Полевской район) скважинами пересечено более десяти рудных интервалов. Разными геологами предлагались различные варианты их увязки, вплоть до экстравагантной для Среднего Урала схемы с субширотным простиранием. Структура месторождения стала понятна только после детального картирования анизотропных (рассланцованных) пород. Оказалось, что известные рудные подсечения легко увязываются между собой по направлению простирания зон с повышенной анизотропией (рис. 6.25). Выяснилось, что рудные зоны залегают согласно с рассланцеванием вмещающих пород, как и на других среднеуральских колчеданных месторождениях. Трудности увязки рудных интервалов возникали из-за того, что месторождение состоит из нескольких рудных зон, приуроченных к различным зонам рассланцевания небольшой мощности.

По результатам картирования анизотропных пород отчетливо выявились субширотные тектонические нарушения, ограничивающие рудовмещающий блок с севера и с юга. За пределами этого блока массивного оруденения не обнаружено. На севере наблюдается мощная полоса рассланцованных пород с вкрапленностью пирита. По всей вероятности северный блок приподнят и здесь наблюдается подрудный эрозионный срез. В южном блоке, напротив, анизотропия, а следовательно и степень рассланцевания, уменьшаются. Несколько южнее приведенного фрагмента при проверке аномалии метода вертикального поля скважинами встречены только три линзочки вкрапленных руд мощностью 1-2 м среди слабодисланцованных порфириров (см. разрез на рис. 6.22, д).

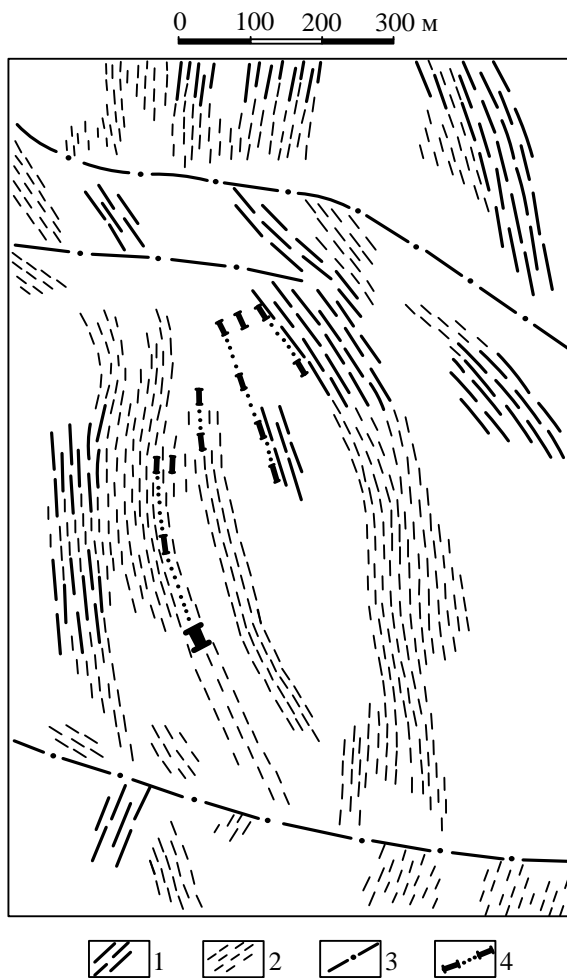


Рис. 6.25. Результаты картирования анизотропных пород на участке Светлороченского колчеданного месторождения:
 1 – зоны повышенной анизотропии с $\lambda_k > 1,45$ (направление штриховки отражает простирание сланцеватости); 2 – то же с $1,2 \leq \lambda_k \leq 1,45$; 3 – тектонические нарушения; 4 – рудные подсечения, вынесенные на поверхность по восстанию пород и их увязка

Разнообразная геологическая информация получена в результате изучения анизотропии пород на Поварненско-Чусовском рудном поле (Полевской район) (рис. 6.26).

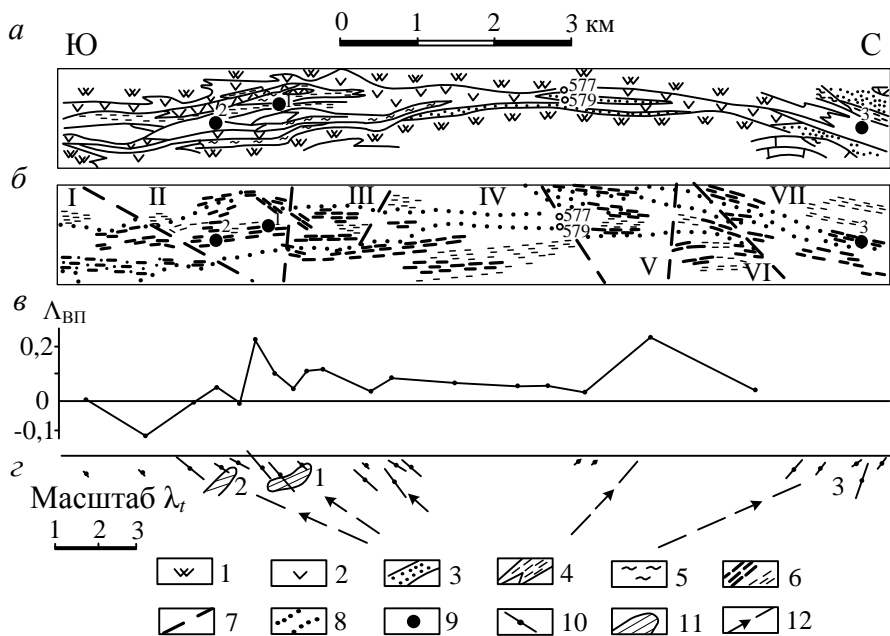


Рис. 6.26. Результаты изучения анизотропии горных пород на Поваренско-Чусовском рудном поле:

a – схематизированная геологическая карта (по С. А. Костромкину, В. П. Хренову, О. Н. Юрпалову и др.); *б* – схема расположения зон повышенной анизотропии; *в* – график $\Delta_{ВП}$; *г* – результаты изучения анизотропии в плоскости слоистости и предполагаемая структура рудного поля.

1 – серпентиниты; 2 – порфириды различного состава; 3 – туффиты и туффопесчаники; 4 – сланцы кварцевохлоритосерицитового состава; 5 – кремнистоуглистые сланцы; 6 – зоны повышенной анизотропии (короткие штрихи – $\lambda=1,3-1,6$, длинные штрихи – $\lambda_k > 1,6$, длинные штрихи с черточкой – $\lambda_k > 2,5$); 7 – тектонические нарушения, выделяющиеся по результатам картирования анизотропных пород; 8 – область низких значений магнитного поля, соответствующая рудовмещающей толще; 9 – месторождения и рудопроявления (1 – Чусовское, 2 – Южно-Чусовское, 3 – Поваренское); 10 – ориентировка осей наибольшей электропроводности (длины отрезков пропорциональны λ_r); 11 – обобщенные проекции рудных тел; 12 – предполагаемое положение путей движения флюидов

На рис. 6.26, б приведена геоэлектрическая схема, построенная по данным картирования анизотропных пород с крестообразной установкой. Рудовмещающая толща, представленная порфиридами разного состава и кварцевохлоритосерицитовыми сланцами, проявляется на ней серией зон повышенной анизотропии (см. рис. 6.26, а, б). Более высокая анизотропия

наблюдается в северной и южной частях участка, в средней части участка в пределах этой полосы анизотропия практически отсутствует. Не выявлено здесь и сланцевых зон. В южной части располагаются Чусовское и Южно-Чусовское месторождения, в северной части – Поварненское рудопроявление.

Участки повышенной анизотропии восточнее рудовмещающей толщи соответствуют зонам рассланцевания в серпентинитах. Вдоль контакта с серпентинитами наблюдается узкая полоса пород с очень высокой ($\lambda_k > 2,5$) анизотропией – это кремнистоуглистые сланцы. Из-за их малой мощности и мелкого масштаба карты полоса этих сланцев и соответствующая им зона высокой анизотропии показаны не везде. В натуре они протягиваются вдоль восточного контакта рудовмещающей толщи практически непрерывно.

По разрывам и смещениям зон повышенной анизотропии на участке выявляется ряд секущих тектонических нарушений. Двумя южными нарушениями ограничивается блок II, вмещающий Чусовское и Южно-Чусовское месторождения (см. рис. 6.26, б). В самом южном блоке I наблюдается лишь рассеянная минерализация. В блоке III, граничащем с рудовмещающим на севере, наблюдаются высокая анизотропия и интенсивная пиритная минерализация. По всей вероятности этот блок приподнят и на поверхности наблюдается подрудный уровень рудовмещающих сланцев.

В центральном блоке IV повышенной анизотропии не наблюдается. Не выявлено здесь и рудовмещающих сланцев, в том числе и в неглубоких скважинах 577 и 579. Возможно, этот блок опущен относительно соседних, и под покрывкой порфиритов могут быть метасоматиты, содержащие оруденение.

Севернее, в блоках V, VI и VII анизотропия вновь усиливается. В самом северном блоке VII располагается Поварненское рудопроявление. В пределах блоков V и VI скважин нет.

На рудном поле выполнено более двадцати определений объемной анизотропии горных пород. В рудовмещающем блоке II и предположительно подрудном блоке III коэффициент анизотропии в плоскости слоистости λ_t резко повышается по срав-

нению с соседними блоками I и IV (см. рис. 6.26, з). Это согласуется с ранее рассмотренным положением, что для возникновения высоких значений λ_t необходимо наличие в горной породе неизометричных однообразно ориентированных хорошо проводящих включений, т. е. практически скоплений рудной вкрапленности.

Большая часть определений λ_t выполнена до открытия Южно-Чусовского месторождения. К открытию этого месторождения привело установление здесь высоких значений λ_t , аналогичных наблюдающимся на известном Чусовском месторождении. Этот факт, в совокупности со слабым искажением поля, при заряде в одну из скважин послужил основанием для бурения проверочных скважин, которые вскрыли оруденение.

Повышенная анизотропия в плоскости слоистости наблюдается и на участке Поварненского рудопроявления в блоке VII. В скважинах 577 и 579, пробуренных в блоке IV, λ_t не превышает 1,2. В блоках V и VI λ_t не определялась из-за отсутствия скважин.

Изучение объемной анизотропии позволило уточнить структуру рудного поля. До этих работ геологи полагали, что на Чусовском месторождении источник рудоносных флюидов располагается на юге. Закономерный наклон осей наибольшей электропроводности на север позволил поставить это представление под сомнение и высказать предположение о расположении источника флюидов севернее месторождения. Позднее это предположение было подтверждено единичными глубокими скважинами. На юге такая скважина не встретила, как ожидалось, кварцевохлоритосерицитовых сланцев, пройдя под ними. На севере, в пределах блока III, скважина пересекла эти сланцы на глубине порядка километра.

На участке Поварненского рудопроявления, напротив, все оси наибольшей электропроводности наклонены к югу. Таким образом, создается впечатление, что Чусовские месторождения и Поварненское рудопроявление – это две ветви единого рудного поля, корневая часть которого располагается в блоке IV (см. рис. 6.26, з).

Пример, приведенный на рис. 6.27, иллюстрирует возможность установления по единичным определениям объемной анизотропии области в продольной вертикальной плоскости, в которой следует выполнять проверку аномалий. На участке выполнены картирование анизотропных пород и наблюдения по методу вертикального поля с планшетами увеличенных размеров, ориентированными по простиранию анизотропных зон. По методу вертикального поля выявлены аномалии А-1, А-2 и А-4 (см. рис. 6.27, а). Аномалиями А-2 и А-4 проявляются рудные тела Калугинского месторождения, аномалия А-1 представляется перспективной на оруденение.

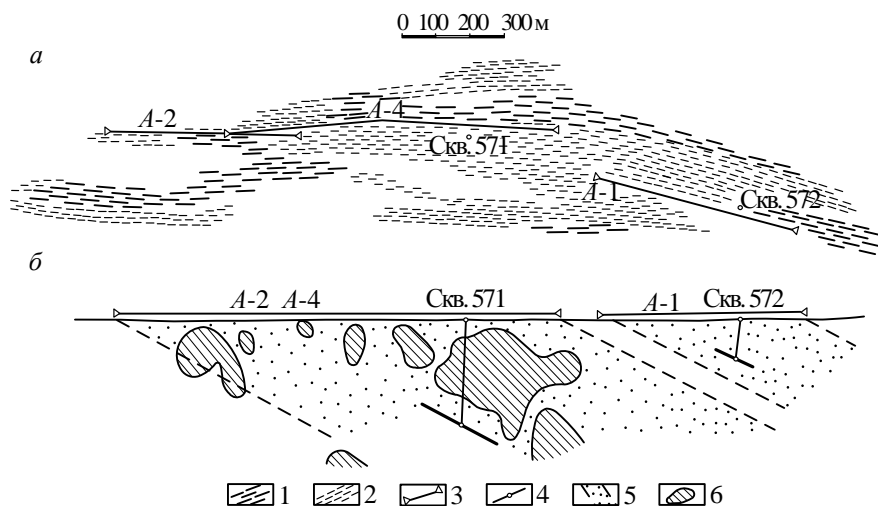


Рис. 6.27. Геоэлектрическая схема и продольная вертикальная проекция Калугинского месторождения:

1 – зоны повышенной анизотропии – $\lambda_k > 1,25$; 2 – то же с $\lambda_k = 1,10-1,25$; 3 – оси аномалий метода вертикального поля; 4 – оси наибольшей электропроводности в вертикальной плоскости; 5 – проводящие зоны, соответствующие аномалиям; 6 – проекции известных рудных тел

В двух скважинах изучена анизотропия в плоскости слоистости. По ориентировке осей наибольшей электропроводности определены направление и угол скатывания электропроводных зон. Линиями, проведенными из концов осей

аномалий параллельно осям наибольшей электропроводности, ограничиваются области пониженного сопротивления, являющиеся причинами аномалий. Как видно из рис. 6.27, б, в пределах области, соответствующей аномальной зоне А-2 и А-4, располагаются все известные рудные тела месторождения. В области, соответствующей аномалии А-1, также могут находиться рудные тела. В этой области и следует располагать проверочные скважины. Скважина 572, пробуренная в противоположную от аномалии сторону (падение пород восточное) не могла ее проверить.

Рассмотренные примеры показывают, что результаты изучения анизотропии горных пород дают разнообразную информацию и могут быть использованы при решении различных геологических задач.

Изучение анизотропии может быть полезным и при работе на участках, где нет рассланцевания, для изучения структуры трещиноватости. В случае одной системы трещин с помощью картирования можно выявлять зоны максимальной трещиноватости. При двух системах трещин, если известно простирающееся простирание каждой системы, по данным картирования возможна приближенная оценка соотношения объема трещин этих систем. При объемном изучении анизотропии в этом случае ориентировка оси наибольшей электропроводности соответствует ориентировке линии пересечения трещин разных систем. Это направление очевидно отражает направление наибольшей проницаемости для флюидов.

6.6. Изучение анизотропии поляризуемости и ее влияние на результаты метода вызванной поляризации

Влияние анизотропии поляризуемости на результаты ВП-СГ. В средней части установки срединного градиента электрическое поле близко к однородному. Внутри вертикального пласта, ориентированного нормально к профилю, в этом случае плотность тока не меняется и кажущееся сопротивление равно истинному поперечному удельному сопротивлению пласта ρ_{n2} .

Если пласт поляризуется, кажущееся сопротивление над ним равно эффективному поперечному удельному сопротивлению

$$\rho_{\kappa}^* = \rho_{n2}^* = \rho_{n2} / (1 - \eta_{n2}).$$

Кажущаяся поляризуемость

$$\eta_{\kappa} = 1 - \frac{\rho_{\kappa}}{\rho_{\kappa}^*} = 1 - \frac{\rho_{n2}}{\rho_{n2}^*} (1 - \eta_{n2}) = \eta_{n2}.$$

Таким образом, в ВП-СГ аномалия над вертикальным анизотропным пластом определяется его поперечной поляризуемостью. Для не вертикальных, но имеющих крутое падение пластов, этот вывод остается в силе, только кажущаяся поляризуемость меньше η_{n2} . Если пласт перекрыт слоем рыхлых отложений, аномалия над ним также определяется его поперечной поляризуемостью.

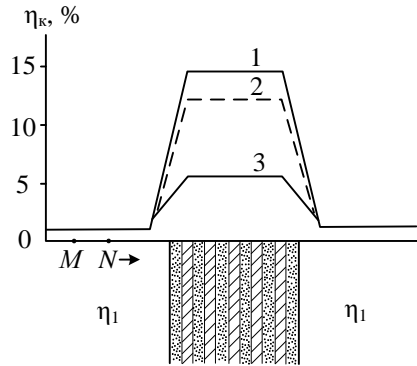
Аномалия над анизотропным пластом определяется его поперечной поляризуемостью, она зависит от распределения поляризующегося материала между компонентами пласта. Если поляризующиеся включения приурочены в основном к плохо проводящим компонентам пласта, интенсивность аномалии η_{κ} больше, чем в случае изотропного пласта с таким же содержанием вкрапленности. Если минерализация приурочена в большей степени к хорошо проводящим компонентам, интенсивность аномалии меньше.

Например, пусть пласт состоит из прослоек с удельными сопротивлениями ρ_1 и $\rho_2 = 5\rho_1$. Мощности прослоек одинаковы. Содержание рудной вкрапленности в пласте 5 %. Поляризуемость основной массы пласта и вмещающей среды 1 %. Тогда при равномерном распределении вкрапленности $\eta_{\text{изб}} = 11,5\%$, $\eta_{\kappa} = \eta_2 = 12,5\%$. Если 90 % вкрапленности сосредоточено в плохо проводящих прослойках, $\eta_{\text{изб}} = 13\%$, $\eta_{\kappa} = \eta_{n2} = 14\%$. При сосредоточении 90 % вкрапленности в прослойках с низким удельным сопротивлением $\eta_{\text{изб}} = 4,8\%$, $\eta_{\kappa} = \eta_{n2} = 5,8\%$ (рис. 6.28).

Рис. 6.28. Графики η_k ВП-СГ над анизотропным поляризующимся пластом:

среднее содержание рудной вкрапленности в пласте 5 %, мощности прослоек одинаковы, отношение удельных сопротивлений прослоек $\rho_2/\rho_1=5$, поляризуемость основной массы и вмещающей среды 1 %.

1 – 90 % вкрапленности в прослойках ρ_2 ; 2 – распределение вкрапленности равномерное; 3 – 90 % вкрапленности в прослойках ρ_1



Рассмотренная зависимость интенсивности аномалии η_k от распределения рудной вкрапленности между компонентами анизотропных пород является одной из причин того, что участки наибольшей интенсивности аномалий часто смещены относительно оруденения.

При оценке содержания поляризующихся включений по интенсивности аномалии ВП над анизотропными породами будет допущена погрешность в сторону увеличения, если $\eta_n > \eta_t$, и в сторону уменьшения, если $\eta_n < \eta_t$.

Влияние анизотропии поляризуемости на результаты ВЭЗ-ВП. Как следует из рассмотренной выше зависимости η_k от ориентировки установки относительно слоистости анизотропной среды, над полого залегающими анизотропными породами по результатам ВЭЗ-ВП можно оценить значения поляризуемости слоев, средние между η_n и η_t . Поэтому в каком-либо учете влияния анизотропии поляризуемости в этом случае нет необходимости. То же самое можно сказать и о влиянии анизотропии η_k на результаты ВЭЗ-ВП над крутопадающими пластами, если установка ориентирована по их простиранию.

Более сложная картина наблюдается при ориентировке установки вкрест простирания крутопадающего анизотропного пласта. Если установка ориентирована по нормали к вертикальному анизотропному по поляризуемости пласту, когда разнос $AB/2$ мал по сравнению с мощностью пласта, кажущаяся поляризуемость над пластом равна продольной поляризуемости пла-

ста η_{r2} . Если размер установки много больше мощности пласта, кажущаяся поляризуемость стремится к поперечной поляризуемости пласта η_{n2} .

Если $\eta_{r2} < \eta_{n2}$, при увеличении размера установки наблюдается увеличение η_k . При таком характере кривой ВЭЗ-ВП можно сделать заключение об усилении минерализации с глубиной, хотя на самом деле степень минерализации с глубиной не меняется.

При $\eta_{r2} > \eta_{n2}$ кажущаяся поляризуемость с увеличением размера установки уменьшается. Из этого можно сделать вывод об уменьшении интенсивности минерализации с глубиной. Фактически же интенсивность аномалии с увеличением глубины может не меняться или даже расти. В последнем случае важная информация об увеличении минерализации с глубиной не будет получена.

Рассмотренные особенности поведения кривых ВЭЗ-ВП над крутопадающими анизотропными пластами указывают на то, что при профилировании по методу ВП интенсивность аномалий зависит от соотношения между размером установки и мощностью пластов.

Таким образом, анизотропия поляризуемости может оказывать заметное влияние на результаты метода вызванной поляризации. Поэтому его надо иметь в виду при интерпретации результатов метода ВП.

Изучение анизотропии поляризуемости. При крутом падении слоистости для определения анизотропии поляризуемости можно использовать зависимость η_k от ориентировки установки, рассмотренную в разделе 5.8. Для выполнения таких исследований на больших массивах более или менее однородных пород можно использовать круговое профилирование с симметричной установкой. Но часто зоны поляризующихся пород, подлежащих изучению, имеют небольшую мощность – до первых сотен метров. Если эти породы перекрыты слоем рыхлых отложений, размер установки должен быть примерно на порядок больше мощности покровных образований. В этом случае симметричная установка может оказаться мало пригодной,

так как ее размер будет соизмерим с мощностью зоны изучаемых пород или даже больше ее.

Наиболее подходящей для изучения анизотропии поляризуемости зон относительно небольшой мощности является квадратная установка (см. раздел 6.2). Глубина исследования этой установки больше, чем симметричной. При одинаковой глубине исследования размер квадратной установки $a \approx AB/5$. Поэтому минимальная мощность изучаемой зоны при использовании квадратной установки может быть в пять раз меньше, чем при круговом профилировании с симметричной установкой.

В квадратной установке при ориентировке линий AB и MN вкрест простирания слоистости кажущаяся поляризуемость η_{kn} в случае крутого падения слоистости близка к η_n . Когда линии AB и MN ориентированы по простиранию слоистости, кажущаяся поляризуемость η_{kt} достаточно сложно зависит как от продольной η_t , так и от поперечной η_n поляризуемости, но в большей степени определяется величиной η_t . Поэтому для определения типа анизотропии поляризуемости и приближенной количественной ее оценки можно вычислять кажущийся коэффициент анизотропии поляризуемости не через истинные, а через кажущиеся значения η :

$$\Lambda_{\text{ВПК}} = \frac{\eta_{kt} - \eta_{kn}}{\eta_{kt} + \eta_{kn}}. \quad (6.29)$$

При необходимости, например, для количественного учета влияния анизотропии поляризуемости на аномалии η_k , можно через кажущиеся поляризуемости определять истинные значения η_t и η_n и вычислять истинный коэффициент $\Lambda_{\text{ВП}}$.

Если $\eta_t < \eta_n$, то $\lambda^* > \lambda$ и $\eta_{kt} < \eta_{kn}$. В этом случае η_{kt} меньше η_t и может быть даже отрицательной. При $\eta_t > \eta_n$, $\lambda^* < \lambda$ и $\eta_{kt} > \eta_{kn}$. В этом случае $\eta_{kt} > \eta_t$. Из приведенных соотношений следует, что кажущийся коэффициент анизотропии поляризуемости $\Lambda_{\text{ВПК}}$ по модулю всегда больше истинного коэффициента $\Lambda_{\text{ВП}}$. Поэтому при слабой анизотропии поляризуемости ее тип по $\Lambda_{\text{ВПК}}$ определяется даже более уверенно.

Если простираение слоистости неизвестно, можно выполнить измерения со скрещенными установками и по полученным результатам рассчитать η_{kn} и η_{kt} .

6.7. Использование результатов изучения анизотропии поляризуемости для классификации аномалий

Изучение анизотропии поляризуемости позволяет по соотношению η_n и η_t оценить распределение поляризующегося материала между компонентами породы разного сопротивления. Эти данные могут быть использованы при оценке аномалий, так как вблизи объектов поисков и на удалении от них распределение рудной вкрапленности или других поляризующихся включений обычно различно.

Рассмотрим этот вопрос на примере колчеданных месторождений Среднего Урала, где он достаточно изучен. На удалении от оруденения сульфидная вкрапленность обычно ассоциирует с кварцем. Поэтому окварцованные участки, имеющие повышенное сопротивление, имеют более высокую поляризуемость. При наличии расланцевания это приводит к превышению η_n над η_t и появлению отрицательных значений $\Lambda_{ВП}$. Вблизи оруденения, особенно на выклинках рудных тел, вкрапленность сульфидов образует прожилки, линзочки и другой формы скопления, приуроченные к более проводящим компонентам породы, представленным в основном хлоритом и серицитом. На таких участках $\eta_t > \eta_n$ и $\Lambda_{ВП}$ имеет положительные значения. Таким образом, для рассматриваемого типа месторождений наибольший интерес представляют аномалии, характеризующиеся положительными значениями $\Lambda_{ВП}$.

Так как соотношение между η_{kn} и η_{kt} в сложной геоэлектрической обстановке в силу разных причин может меняться при изменении размера установки, целесообразно выполнять измерения в варианте зондирования.

На рис. 6.29 приведены кривые зондирования η_{kn} , η_{kt} и $\Lambda_{ВП}$, полученные с квадратной установкой на Ново-Шайтанском колчеданном месторождении (Кировградский рай-

он). На точке, расположенной вблизи рудных тел, при всех размерах установки продольная η_k больше поперечной и соответственно $\Lambda_{ВП} > 0$. С увеличением размера установки разница между η_{kt} и η_{kn} увеличивается (см. рис. 6.29, а). Из этого можно сделать вывод, что с увеличением глубины тенденция сосредоточения поляризующегося материала в более проводящих компонентах породы усиливается.

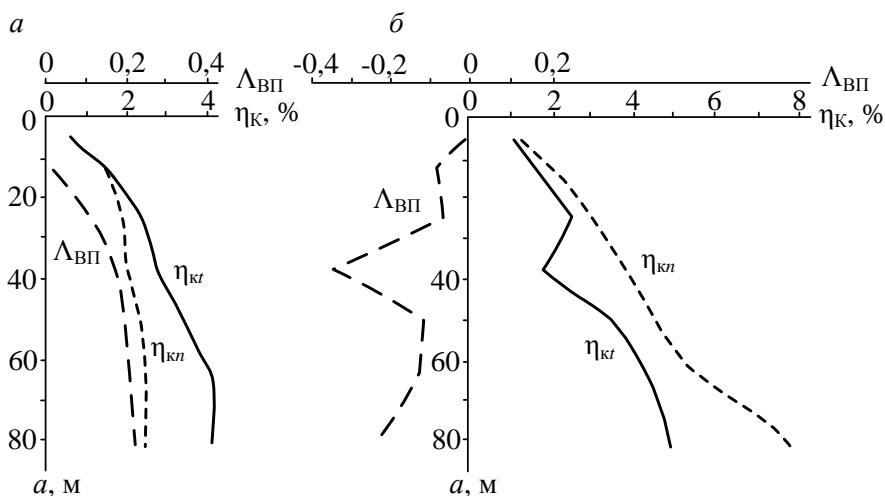


Рис. 6.29. Кривые зондирования η_k и $\Lambda_{ВП}$ вблизи рудного тела (а) и на удалении от оруденения (б)

На точке, расположенной на некотором удалении от рудных тел, поперечная кажущаяся поляризуемость превышает продольную и $\Lambda_{ВП}$ имеет отрицательные значения (см. рис. 6.29, б). Это указывает на малую вероятность наличия оруденения в окрестностях точки зондирования, несмотря на высокие значения кажущейся поляризуемости.

На плане изолиний η_k по методу ВП-СГ на этом месторождении повышенными значениями отмечается вся полоса рудовмещающих кварцевохлоритосерицитовых сланцев. Локальными участками наиболее высоких значений η_k выявляется только южная часть месторождения, где рудные тела залегают

на малой глубине. Залегающие на глубине порядка 200 м основные рудные тела располагаются у восточной границы зоны повышенных значений кажущейся поляризуемости и на плане изолиний η_k не проявляются (рис. 6.30, а, в).

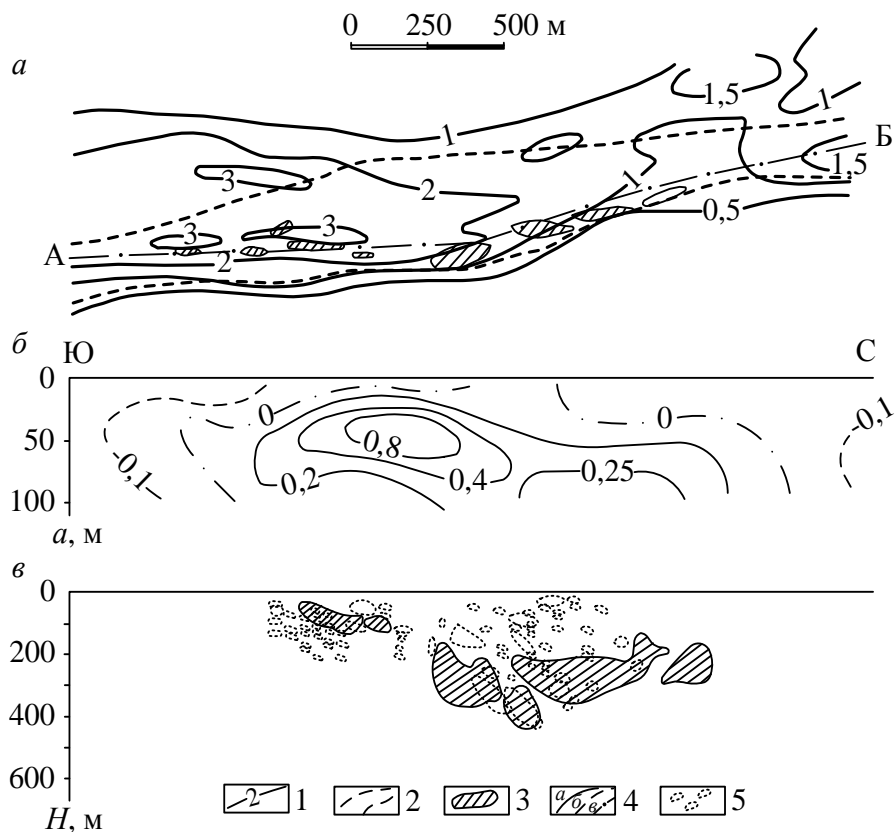


Рис. 6.30. Результаты изучения вызванной поляризации на Ново-Шайтанском колчеданном месторождении (Кировоградский район):

а – план изолиний η_k по методу ВП-СГ; б – вертикальная карта Λ_{VP} по линии А-Б; в – продольная вертикальная проекция месторождения (по Ф. М. Поткину и др.).

1 – изолинии η_k ; 2 – контур рудовмещающих кварцевохлоритсеричитовых сланцев; 3- проекция рудных тел; 4 – изолинии Λ_{VP} : а – положительные, б – отрицательные, в – нулевые; 5 – проекции некондиционных вкрапленных рудных тел

На вертикальной карте, построенной по профилю, проходящему вдоль рудного поля, месторождение отмечается областью высоких положительных значений $\Lambda_{ВП}$. Южнее и севернее месторождения значения $\Lambda_{ВП}$ становятся отрицательными (см. рис. 6.30, б). Конечно, на результаты измерений с квадратной установкой с размерами до 110 м, залегающие на глубине 200 м рудные тела не могли оказать какого-либо влияния. Эффект вызвали многочисленные скопления убогой вкрапленности сульфидов над рудными телами. Наиболее крупные из этих скоплений показаны на продольной вертикальной проекции месторождения (см. рис. 6.30, в).

Другой пример локализации колчеданного месторождения по результатам изучения анизотропии поляризуемости приведен на рис. 6.31. При съемке по методу ВП-СГ, как и в предыдущем примере, отчетливо картируется полоса сланцев, вмещающих Северо-Ольховское месторождение (район г. Н. Тагила). При этом наиболее высокие значения η_k наблюдаются в северной части участка, где оруденения не выявлено (см. рис. 6.31, а, в).

По результатам изучения анизотропии поляризуемости с помощью квадратной установки построена вертикальная карта $\Lambda_{ВП}$ по профилю, проходящему вдоль участка. На ней над месторождением наблюдаются положительные значения $\Lambda_{ВП}$. Севернее и южнее месторождения коэффициент $\Lambda_{ВП}$ отрицателен или близок к нулю (см. рис. 6.31, б).

На приведенном ранее рис. 6.26, в показан график $\Lambda_{ВП}$ по профилю, пройденному вдоль Поварненско-Чусовского рудного поля. График построен для максимального размера квадратной установки ($a=110$ м). Над обоими Чусовскими месторождениями и над их северным флангом наблюдаются положительные значения $\Lambda_{ВП}$. Южнее тектонического нарушения, ограничивающего рудовмещающий блок, $\Lambda_{ВП}$ принимает отрицательные значения. Севернее месторождения значения $\Lambda_{ВП}$ хотя и остаются положительными, но уменьшаются по величине. Только в точке, расположенной в блоке V, наблюдается высокое положительное значение $\Lambda_{ВП}$. Как уже указывалось ранее по другим

соображениям, в этом блоке не исключено наличие оруденения. К сожалению, по условиям местности не были выполнены наблюдения на Поварненском рудопроявлении

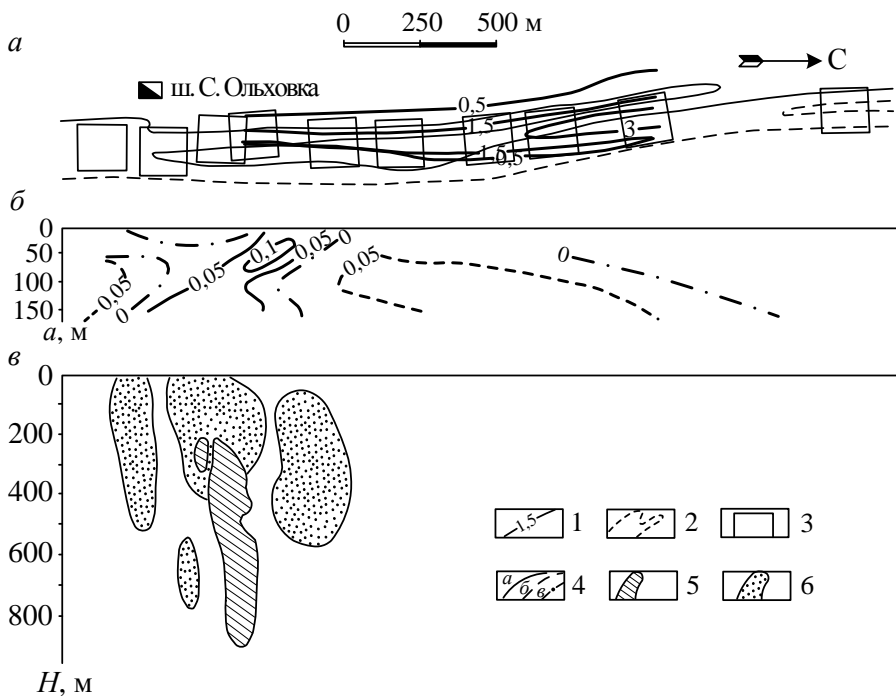


Рис. 6.31. Результаты изучения вызванной поляризации на Северо-Ольховском колчеданном месторождении (по П. Н. Коврижных):

a – план изолиний η_k по методу ВП-СГ; *б* – вертикальная карта $\Lambda_{ВП}$; *в* – продольная вертикальная проекция месторождения.

1 – изолинии η_k ; 2 – контур рудовмещающих кварцевохлоритосерицитовых сланцев; 3- контуры квадратных установок при максимальных разносах; 4 – изолинии $\Lambda_{ВП}$: *a* – положительные, *б* – отрицательные, *в* – нулевые; 5 – контуры массивных рудных тел; 6 – контуры вкрапленного оруденения

В приведенных примерах рассмотрены результаты изучения анизотропии поляризуемости на среднеуральских колчеданных месторождениях. На других типах месторождений критерии классификации аномалий по $\Lambda_{ВП}$ могут быть другими. Их надо устанавливать для каждого типа месторождений и каждой геологической провинции.

7. МЕТОДЫ СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

7.1. Принцип методов становления поля и их модификации

В методах становления поля изучаются неустановившиеся электромагнитные поля, вызванные переходными процессами в среде при включении или выключении тока в генераторном контуре. Возбуждение поля может быть как индуктивным (с помощью незаземленного контура из изолированного провода), так и кондуктивным (с помощью заземленной питающей линии). Чаще используется индуктивное возбуждение. Измерения, как правило, выполняются индуктивным способом.

Рассмотрим процессы, протекающие после выключения питающего тока. При выключении импульса постоянного тока в генераторном контуре его, магнитное поле скачком изменяется от установившегося значения до нуля. Но изменение магнитного поля с бесконечно большой скоростью невозможно, так как при этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в окружающей среде должна была бы возникнуть бесконечно большая э. д. с. индукции. Этого не происходит, потому что при изменении магнитного поля, вызванного током в генераторном контуре, возникают вихревые токи в среде. Магнитное поле этих вихревых токов в первый момент замещает магнитное поле тока в контуре. В дальнейшем вихревые токи постепенно затухают вследствие тепловых потерь, а вместе с ними плавно убывает до нуля и их магнитное поле. С течением времени электромагнитное поле не только уменьшается по интенсивности, но и происходит его перераспределение в пространстве.

В начальный период после выключения тока в генераторном контуре вихревые токи в земле концентрируются в области, непосредственно примыкающей к контуру. Распространения вихревых токов на глубину и в стороны не происходит, потому что в начальной стадии электромагнитное поле быстро уменьшается и в его спектре преобладают высокочастотные гармоники, для которых сильно выражен скин-эффект.

Поле на этой стадии содержит информацию об электромагнитных свойствах самой верхней части разреза вблизи генераторного контура.

С течением времени высокочастотная часть поля затухает из-за поглощения энергии средой. Для гармоник меньшей частоты скин-эффект выражен слабее и поле проникает на большую глубину, одновременно распространяясь и в горизонтальном направлении. Максимальная плотность вихревых токов наблюдается на глубине $z_{\text{эф}}$ на расстоянии $r_{\text{эф}}$ от источника. Эта область имеет вид кольца, окружающего генераторный контур (рис. 7.1). По мере распространения поля на глубину оно несет информацию о все более глубоких горизонтах разреза. Если в разрезе есть локальные хорошо проводящие объекты, в них возникают интенсивные вихревые токи, создающие локальные аномалии вторичного магнитного поля. С течением времени локальные вихревые токи из-за тепловых потерь затухают.

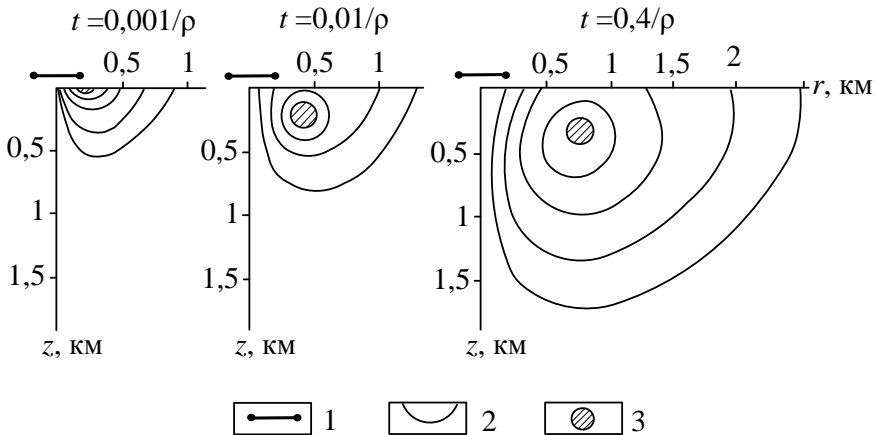


Рис. 7.1. Пространственное распределение вихревых токов в разные моменты (по М. Набигяну):

1 – генераторная петля; 2 – изолинии плотности вихревых токов; 3 – области наибольшей плотности вихревых токов

На поздней стадии процесса вследствие взаимодействия между вихревыми токами и их магнитным полем происходит

выравнивание распределения вихревых токов в части разреза от поверхности земли до глубины проникновения поля. Электромагнитное поле на поздней стадии становления содержит информацию о продольной проводимости этой части разреза.

Таким образом, в разные моменты времени максимум плотности вихревых токов располагается на различной глубине. Эту глубину, называемую эффективной ($z_{эф}$), можно рассматривать, как глубину проникновения поля. В однородной среде ее можно оценить по формуле:

$$z_{эф} = 700 \sqrt{\mu_{отн} \rho t}, \quad (7.1)$$

где t – время, отсчитываемое от момента выключения тока в генераторном контуре; ρ – удельное сопротивление среды; $\mu_{отн}$ – относительная магнитная проницаемость среды.

Расстояние по горизонтали от генераторного контура до кольца с максимальной плотностью тока примерно вдвое больше $z_{эф}$.

По отношению расстояния r до генераторного контура и $z_{эф}$ выделяются три зоны:

- $r < z_{эф}$ – ближняя зона, располагается внутри кольца с максимальной плотностью вихревых токов;
- $r \gg z_{эф}$ – дальняя зона, располагающаяся за пределами кольца с максимальной плотностью тока на значительном удалении от него;
- промежуточная зона, внутри которой находится область наиболее интенсивных вихревых токов, располагающаяся между ближней и дальней зонами.

В настоящее время неустановившиеся поля изучают обычно в ближней зоне. Предпочтение работе в ближней зоне отдают из-за большей технологичности – меньший размер установки, а главное, из-за большей детальности изучения разреза, как по горизонтали, так и по вертикали. В промежуточную зону выходят, когда при одном положении генераторного контура проводят площадные исследования, одновременно выполняя измерения на ряде точек с помощью нескольких десятков измерительных контуров.

В этом случае более удаленные измерители выходят за пределы ближней зоны, что приводит к усложнению интерпретации результатов. Из-за большого расстояния между генераторным контуром и точками наблюдений в этой модификации необходимо мощное первичное поле. Такие работы выполнялись в 80-х годах прошлого века в Прикаспии. В качестве генератора мощного импульса использовался МГД-генератор.

Рассмотрим более подробно поведение устанавливающегося поля в ближней зоне в горизонтально-слоистой среде. Особенностью поля в ближней зоне является неодновременность наступления поздней стадии в разных слоях. В начальной стадии, когда происходит быстрое уменьшение поля, вследствие сильного влияния скин-эффекта вихревые токи сосредоточены в примыкающей к генераторному контуру части верхнего слоя. Поле на начальной стадии содержит информацию об электромагнитных свойствах этой самой верхней части разреза. С течением времени область распространения вихревых токов расширяется, и постепенно они равномерно заполняют весь слой. В верхнем слое наступает поздняя стадия становления поля. На этой стадии поле содержит информацию о продольной проводимости верхнего слоя S_1 .

К этому времени скорость изменения поля уменьшается, действие скин-эффекта ослабевает и вихревые токи начинают распространяться в нижележащий слой. Сначала интенсивность вихревых токов во втором слое нарастает, затем начинает уменьшаться. Пока интенсивность вихревых токов во втором слое нарастает, их магнитное поле направлено противоположно магнитному полю затухающих токов в верхнем слое. Но так как интенсивность токов во втором слое в это время мала, по сравнению с интенсивностью токов в верхнем слое, их влияние на результатах измерений практически не проявляется. В дальнейшем, когда вихревые токи во втором слое начинают затухать, их магнитное поле складывается с магнитным полем токов в верхнем слое. Постепенно вихревые токи равномерно заполняют второй слой, и в нем тоже наступает поздняя стадия. Электромагнитное поле на этой стадии содержит информацию о сум-

марной продольной проводимости двух верхних слоев разреза $S_{1,2}=S_1+S_2$.

Таким же образом при дальнейшем протекании процесса вихревые токи последовательно заполняют все слои, пока не заполнят всю проводящую толщу. Когда поздняя стадия наступает во всех слоях проводящей части разреза, электромагнитное поле содержит информацию о суммарной продольной проводимости всего разреза $S=S_1+S_2+\dots+S_{n-1}$.

Если в разрезе есть локальные, хорошо проводящие объекты, когда поле распространяется до этих объектов, внутри них индуцируются локальные вихревые токи, создающие локальные магнитные поля. По этим полям может быть установлено наличие и местоположение таких тел и определены их характеристики. Внутри локального проводника, как и в слое, происходит постепенное заполнение его объема вихревыми токами, т. е. переход от ранней стадии к поздней. Вначале из-за сильного проявления скин-эффекта вихревые токи протекают в приповерхностной части объекта. По мере уменьшения скорости изменения поля действие скин-эффекта ослабевает и токи распространяются внутрь проводника. В позднюю стадию токи равномерно заполняют весь объем объекта. На этом этапе магнитное поле вихревых токов несет информацию о проводимости объекта для вихревых токов. По нему можно определить произведение удельной электропроводности объекта γ на квадрат его характерного размера – γa^2 . Для шара характерный размер a соответствует радиусу. В случае объекта произвольной формы характерный размер имеет смысл радиуса эквивалентного шара.

Поведение во времени индуцированной в измерительном контуре э. д. с. для любого геоэлектрического разреза определяется обобщенным временным параметром

$$\tau = t\alpha, \quad (7.2)$$

где α – параметр, зависящий от электромагнитных свойств и геометрии среды.

Для локальных объектов

$$\alpha = \frac{1}{\mu\gamma a^2}. \quad (7.3)$$

Для полупространства

$$\alpha = \frac{1}{\mu\gamma L^2}, \quad (7.4)$$

где L – радиус круглого генераторного контура или половина стороны квадратной петли. В этом случае размер генераторного контура характеризует размер области, в которой возбуждается поле, и является аналогом размера проводящего объекта.

В случае тонкого проводящего пласта

$$\alpha = \frac{1}{\mu SL}. \quad (7.5)$$

В этом выражении продольная проводимость пласта S заменяет произведение γL .

Зависимость параметра τ , который может быть определен по результатам измерений, от параметров геоэлектрического разреза является физической основой использования неустановившегося поля для решения геологических задач.

Как следует из приведенных уравнений, параметр τ зависит от удельной электропроводности среды, в которой распространяются вихревые токи. В однородной среде, согласно формул (7.2) и (7.4), $\tau = \frac{t}{\mu\gamma L^2}$. Отсюда

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{\mu L^2 \tau}{t}. \quad (7.6)$$

Параметр τ можно определить по результатам измерений. В неоднородной среде по формуле (7.6) будет получено кажущееся сопротивление. Таким образом, по результатам измерений неустановившегося поля можно вычислять, как в большинстве методов электроразведки, эффективный параметр – кажущееся сопротивление, и использовать его при интерпретации.

При изучении неустановившегося поля используют различные типы установок. В методе переходных процессов (МПП)

наиболее часто используют однопетлевую установку (рис. 7.2, *а*), в которой одна и та же петля служит и генераторным и измерительным контуром. Это возможно, так как измерения выполняются в паузах между импульсами тока. Точно такими же свойствами обладает установка с совмещенными петлями, в которой провода генераторного и измерительного контуров располагаются вплотную один к другому (см. рис. 7.2, *в*). Эта установка применяется в случаях, когда измерения выполняют через очень малые (микросекундные) интервалы времени после выключения тока. В однопетлевой установке при таких измерениях могут возникать помехи из-за переходных процессов в контуре при выключении тока. Установка с совмещенными петлями применяется в основном в зондировании становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и иногда в МПП.

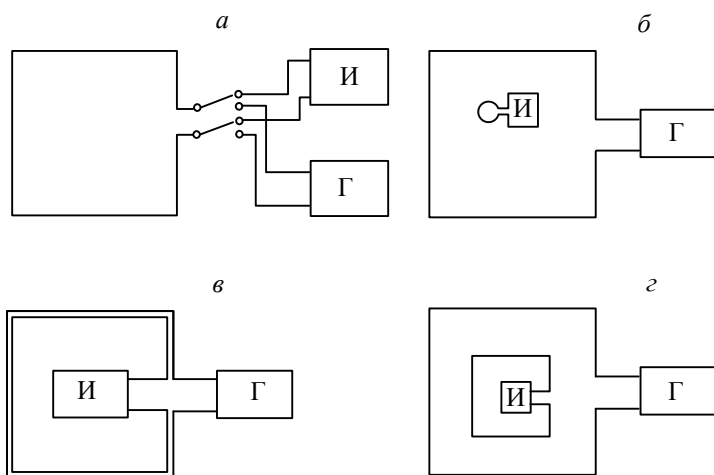


Рис. 7.2. Типы установок, применяемых при изучении неустановившихся полей в ближней зоне:

а – однопетлевая установка; *б* – установка с автономной приемной рамкой; *в* – установка с совмещенными петлями; *г* – установка “петля в петле”.

Г – генератор; И – измеритель

Установка с автономной приемной рамкой, в которой измерительный контур (рамка) перемещается по профилям внутри

генераторного контура (см. рис. 7.2, б) используется в МПП для детализационных исследований.

Установка "петля в петле" (см. рис. 7.2, з) применяется при зондировании становлением поля в ближней зоне.

Кроме установок, показанных на рис. 7.2 при изучении неустановившихся полей могут использоваться все типы установок, применяющихся при электромагнитных зондированиях (см. [1, часть 2], рис. 10.1).

Измерения неустановившегося электромагнитного поля в ближней зоне можно использовать для изучения слоистых разрезов – определения мощностей и удельных сопротивлений слоев и для поисков локальных хорошо проводящих объектов. Модификации, применяющиеся для решения этих геологических задач, получили названия зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и метода переходных процессов (МПП) соответственно. Они имеют общую физическую основу, выполняются по аналогичным методикам и различаются только подходом к интерпретации результатов.

7.2. Определение кажущегося удельного сопротивления и кажущейся продольной проводимости

При изучении неустановившихся полей возбуждение поля в большинстве случаев осуществляется с помощью незаземленного генераторного контура. В этом случае индуцированная в измерительном контуре э. д. с. определяется выражением:

$$\mathcal{E} = \frac{2\pi I}{\gamma L} f(\tau), \quad (7.7)$$

где L – половина стороны квадратной петли или радиус круглой петли (фактически формулы этого раздела получены для круглой петли, но они с достаточно хорошим приближением описывают и поле квадратной петли сопоставимого размера); I – сила тока в генераторном контуре; γ – удельная электропроводность среды; $f(\tau)$ – сложная функция от обобщенного временного параметра τ .

Для установки с совмещенными петлями и для однопетлевой установки

$$f(\tau) = \int_0^{\infty} x J_1^2(x) \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} \left\{ e^{-x^2\tau} - x\sqrt{\pi\tau} [1 - \Phi(x\sqrt{\tau})] \right\} dx, \quad (7.8)$$

где $J_1(x)$ – функция Бесселя,

$$\Phi(x\sqrt{\tau}) = \frac{2}{\pi} \int_0^{x\sqrt{\tau}} e^{-v^2} dv \quad \text{– интеграл вероятности.}$$

Графики функции $f(\tau)$ для совмещенных петель и для автономной рамки в центре генераторной петли приведены на рис. 7.3.

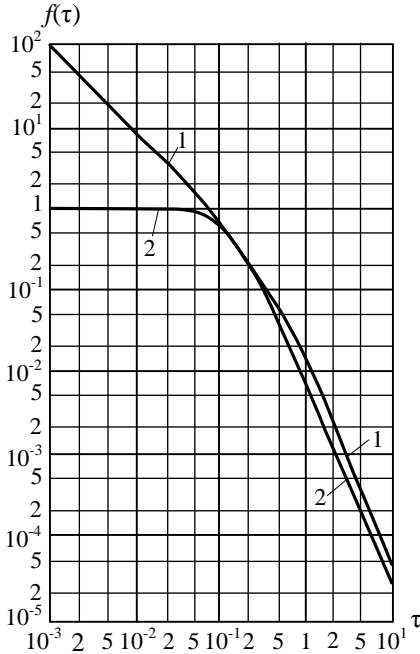


Рис. 7.3. Графики функций $f(\tau)$ по Ф. М. Каменецкому и др.:

1 – для совмещенных петель; 2 – для автономной приемной рамки в центре генераторной петли

Формула для $f(\tau)$ упрощается при малых и больших значениях параметра τ , т. е. практически при малых и больших значениях времени t . Для совмещенных петель

$$\text{при } \tau \leq 0,01 \quad f(\tau) \approx \frac{1}{4\pi\tau}, \quad (7.9)$$

$$\text{при } \tau \geq 3 \quad f(\tau) \approx \frac{1}{40\sqrt{\pi\tau}^{5/2}}. \quad (7.10)$$

Подставив значение функции $f(\tau)$ в формулу (7.7), по измеренной величине ε . д. с. в измерительном контуре можно определить удельное сопротивление среды:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{L}{2\pi f(\tau)} \varepsilon/I. \quad (7.11)$$

Для непосредственного вычисления удельного сопротивления это выражение непригодно, так как функция $f(\tau)$ сама зависит от ρ . Найдем рабочую формулу для вычисления удельного сопротивления в наиболее важном для МПП случае $\tau \geq 3$. Подставив в формулу (7.7) выражение (7.10) и заменив $1/\gamma L$ на $\mu L \tau/t$ в соответствии с формулой (7.6), получим:

$$\varepsilon/I = \frac{2\pi}{\gamma L} \cdot \frac{1}{40\sqrt{\pi\tau}^{5/2}} = \frac{2\pi\mu L\tau}{40\sqrt{\pi\tau}^{5/2}t} = \frac{\sqrt{\pi}\mu L}{20t\tau^{3/2}} = \frac{\sqrt{\pi}\mu^{5/2}\gamma^{3/2}L^4}{20t^{5/2}}. \quad (7.12)$$

Решив уравнение (7.12) относительно γ , получим:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = (I/\varepsilon)^{2/3} \cdot \left(\frac{\sqrt{\pi}\mu^{5/2}L^4}{20t^{5/2}} \right)^{2/3} = (I/\varepsilon)^{2/3} \cdot \frac{\pi^{1/3}\mu^{5/3}L^{8/3}}{20^{2/3}t^{5/3}}. \quad (7.13)$$

Удельное сопротивление вычисляется более удобно, если расчет выполнять в два этапа, вычисляя сначала τ , а затем ρ . При этом можно положить $\mu = \mu_0$ и рассчитать числовые коэффициенты. Параметр τ находится из уравнения (7.12):

$$\tau = (I/\varepsilon)^{2/3} \cdot \left(\frac{\sqrt{\pi}\mu_0 L}{20t} \right)^{2/3} = (I/\varepsilon)^{2/3} \cdot \left(\frac{1,11L \cdot 10^{-7}}{t} \right)^{2/3}. \quad (7.14)$$

Подставив значение τ в формулу (7.6), найдем выражения для удельной электропроводности и удельного сопротивления среды:

$$\gamma = \frac{t}{\mu_0 L^2 \tau} \approx \frac{7,96t}{L^2 \tau} \cdot 10^5, \quad \rho = \frac{\mu_0 L^2 \tau}{t} \approx \frac{1,26L^2 \tau}{t} \cdot 10^{-6}. \quad (7.15)$$

В случае неоднородной среды по приведенным выше формулам будут получены кажущееся удельное сопротивление ρ_τ и кажущаяся удельная электропроводность γ_τ .

Практически \mathcal{E}/I измеряется в мкВ/А, а t – в миллисекундах. Поэтому формулы (7.14) и (7.15) удобнее привести к этим единицам. Тогда выражения принимают вид:

$$\tau_k \approx (I/\mathcal{E})^{2/3} \cdot \left(\frac{111L}{t} \right)^{2/3}, \quad (7.14')$$

$$\gamma_\tau \approx \frac{796t}{L^2 \tau_k}, \quad \rho_\tau \approx \frac{L^2 \tau_k}{796t}. \quad (7.15')$$

Кроме кажущегося сопротивления по результатам измерений неустановившегося поля может быть определена кажущаяся продольная проводимость S_τ . Фактически S_τ – это продольная проводимость очень тонкого слоя (проводящей плоскости), расположенного на кажущейся глубине H_τ . Можно рассматривать S_τ как продольную проводимость среды между этой плоскостью и поверхностью земли. Кажущаяся глубина тоже зависит от геоэлектрического разреза и может быть рассчитана по результатам измерений. В. А. Сидоровым и В. В. Тикшаевым предложен метод интерпретации, основанный на анализе зависимости S_τ от H_τ , получивший название способа плавающей плоскости.

Не рассматривая ход решения задачи приведем расчетные формулы для S_τ и H_τ :

$$S_\tau = \frac{2}{\mu_0} \left(\frac{2\pi}{3\mu_0 Qq} \right)^{1/3} \left[\frac{t_{i+1}^{-t} - t_i^{-t}}{\left(\mathcal{E}_{i+1}/I \right)^{-1/4} - \left(\mathcal{E}_i/I \right)^{-1/4}} \right]^{4/3}; \quad (7.16)$$

$$H_{\tau} = \frac{t_{i+1} (\mathcal{E}_{i+1}/I)^{1/4} - t_i (\mathcal{E}_i/I)^{1/4}}{\mu_0 S_{\tau} [(\mathcal{E}_i/I)^{1/4} - (\mathcal{E}_{i+1}/I)^{1/4}]} \quad (7.17)$$

В этих выражениях Q и q – эффективные площади генераторного и измерительного контуров соответственно.

При любом геоэлектрическом разрезе с течением времени увеличивается глубина проникновения поля и увеличивается мощность слоя между поверхностью земли и эквивалентной плоскостью ("плавающей" плоскостью). Поэтому величина S_{τ} при увеличении времени t всегда растет. Кажущаяся глубина H_{τ} при увеличении времени t тоже растет, но скорость ее изменения зависит от электромагнитных свойств среды. При достижении полем слоя или объекта с пониженным сопротивлением скорость увеличения H_{τ} замедляется, так как в соответствии с формулой (7.1) замедляется рост $z_{\text{эф}}$.

7.3. Зондирование становлением поля в ближней зоне

Зондирование становлением поля в ближней зоне чаще всего выполняется с установками с совмещенными петлями или "петля в петле". Размеры петель при этом выбирают не больше глубины зондирования, обычно в полтора-два раза меньше. При необходимости более детального изучения верхней части разреза дополнительно выполняют зондирования с петлями меньших размеров. Шаг наблюдений по профилям обычно соответствует размеру петли. Расстояние между профилями при выраженном простирании линейных структур может быть больше размера петли. Использование установок с размерами меньшими глубины зондирования позволяет существенно увеличить детальность изучения геоэлектрического разреза как по горизонтальному, так и по вертикальному направлению по сравнению с другими видами зондирования.

При дипольном зондировании на постоянном токе размер установки должен по крайней мере в пять раз превышать глубину зондирования. Таким же должен быть и полуразнос питающих заземлений $AB/2$ при зондировании с симметричной уста-

новкой. При электромагнитных зондированиях на переменном токе размер установки также должен превышать глубину зондирования по крайней мере втрое. Поэтому по результатам таких зондирований получаются результаты, осредненные по достаточно большой площади и могут быть выявлены только структуры, горизонтальный размер которых превышает глубину их залегания. Кроме того, при использовании дипольных установок серьезной проблемой является неопределенность положения точки записи, за исключением двусторонних дипольных зондирований.

В ЗСБ при использовании указанных выше типов установок, размер которых меньше глубины исследования, выделяются структуры с горизонтальными размерами меньшими глубины залегания. При этом снимается вопрос о положении точки записи, так как центры генераторного и измерительного контуров совмещены.

Чтобы изучать геоэлектрический разрез до глубины 2-3 км, необходимо выполнять измерения в широком временном диапазоне, обычно от единиц микросекунд до сотен и тысяч миллисекунд, т. е. время t изменяется на 5-6 порядков. Наиболее подходящей для ЗСБ отечественной аппаратурой являются "Каскад-М" и "Цикл-5". "Каскад-М" предназначен для зондирования от самой верхней части разреза до глубины 1,5 км. Его временной диапазон 0,002 – 130 мс. "Цикл-5" позволяет выполнять зондирования до большей глубины, но при этом выпадает верхняя часть разреза, так как минимальное время $t=0,1$ мс. Максимальное время может достигать нескольких минут. Оба типа аппаратуры имеют достаточно мощные генераторные устройства, обеспечивающие в генераторной петле силу тока в несколько десятков ампер.

7.4. Принципы интерпретации результатов ЗСБ

Результаты ЗСБ, как и других модификаций зондирования, изображаются в виде кривых зондирования, построенных в логарифмическом масштабе. При построении практических

кривых по оси абсцисс откладывается величина $\sqrt{2\pi t}$, так как параметром, контролирующим глубину исследования, является \sqrt{t} . По оси ординат откладывается кажущееся сопротивление ρ_τ . Характер кривых ЗСБ аналогичен кривым других модификаций зондирования. При малых значениях t ρ_τ стремится к ρ_1 - удельному сопротивлению верхнего слоя. Конечной асимптотой является удельное сопротивление нижнего слоя ρ_N . В случае, когда $\rho_N \rightarrow \infty$, как и в частотных зондированиях, кривая выходит на асимптоту, наклоненную к оси абсцисс под углом $63^\circ 25'$. Под таким же углом, но в противоположном направлении, наклонена конечная асимптота в случае $\rho_N \rightarrow 0$. В средней части кривой относительные изменения ρ_τ отражают изменение удельных сопротивлений слоев разреза.

Теоретические кривые строят, как в других видах зондирования, в относительных координатах. По оси абсцисс откладывают отношение $\tau_1 / h_1 = \sqrt{2\pi\rho_1} \cdot 10^7 / h_1$ (не путать с $\tau=at$), по оси ординат - ρ_τ/ρ_1 . Параметр τ_1 имеет размерность единицы длины. Пример двухслойных кривых и трехслойных кривых типа H приведен на рис. 7.4.

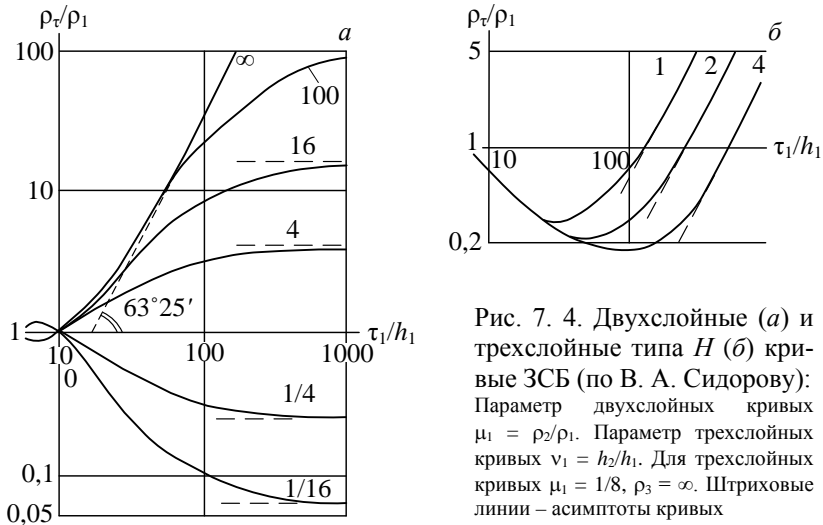


Рис. 7. 4. Двухслойные (а) и трехслойные типа H (б) кривые ЗСБ (по В. А. Сидорову): Параметр двухслойных кривых $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$. Параметр трехслойных кривых $\nu_1 = h_2/h_1$. Для трехслойных кривых $\mu_1 = 1/8, \rho_3 = \infty$. Штриховые линии - асимптоты кривых

Так как зондирование выполняется в широком временном диапазоне, для большей части этого диапазона условия (7.9) и (7.10) не соблюдаются и функцию $f(\tau)$ нельзя вычислять по приближенным упрощенным формулам. Необходимо использовать точную формулу (7.8). Поэтому расчет кривых ЗСБ весьма сложен. Из-за этого рассчитано лишь небольшое количество палеток, а при компьютерной интерпретации требуются сложные программы и большой расход машинного времени. По этой причине часто пользуются приближенными способами интерпретации, основанными на использовании характерных точек кривых. Например, по трехслойным кривым типа H глубину до опорного горизонта и продольную проводимость надопорной толщи можно оценить по координатам точки минимума:

$$H \approx 360 \sqrt{2\pi t_{\text{мин}} \rho_{\text{тмми}}} ; \quad (7.18)$$

$$S \approx 452 \sqrt{2\pi t_{\text{мин}} / \rho_{\text{тмми}}} . \quad (7.19)$$

Для приближенной интерпретации результатов ЗСБ широко используется способ плавающей плоскости. В этом способе вместо кривой ρ_{τ} строится график зависимости S_{τ} от H_{τ} . По мере увеличения времени t увеличиваются глубина проникновения поля и, рассчитываемая по формуле (7.17), кажущаяся глубина H_{τ} . Так как при этом увеличивается мощность слоя между поверхностью земли и глубиной H_{τ} , на которой находится плавающая плоскость, растет и кажущаяся продольная проводимость S_{τ} .

Скорость нарастания S_{τ} зависит от удельного сопротивления среды. В слоях с низким удельным сопротивлением даже незначительное увеличение мощности вызывает заметный рост S_{τ} . Поэтому такие слои характеризуются участками быстрого роста S_{τ} при увеличении H_{τ} (т. е. при увеличении t). В слоях с низкой электропроводностью увеличение мощности меньше сказывается на величине S_{τ} . На этих участках график S_{τ} наклонен к оси H_{τ} под небольшим углом. Поэтому график зависимости S_{τ} от H_{τ} имеет вид ломаной линии с чередующимися пологими и крутыми участками (рис. 7.5). Значения H_{τ} в конце каждого участка быстрого изменения S_{τ} в первом приближении

соответствуют подошвам хорошо проводящих слоев, а значения S_τ – продольной проводимости части разреза, расположенной выше этого уровня.

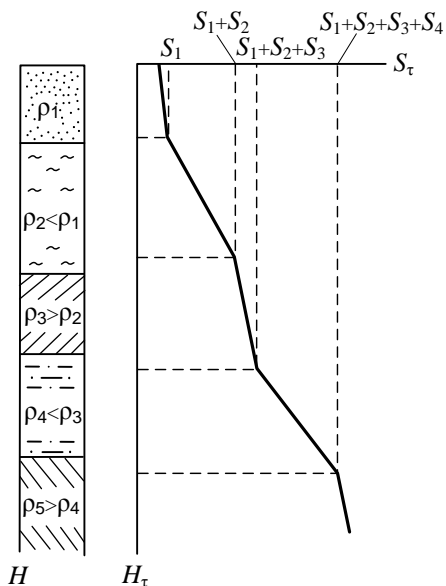


Рис. 7.5. Связь между геоэлектрическим разрезом и графиком $S_\tau(H_\tau)$

Так как значения H_τ обычно не очень сильно отличаются от истинных глубин, можно строить разрезы и структурные карты для H_τ . Они качественно отражают структуру участка. Если на участке есть точки, где известны истинные глубины (например, скважины), можно найти переходный коэффициент между H_τ и истинной глубиной и выполнять построения для истинных глубин.

Практический пример результатов ЗСБ в сопоставлении с данными каротажа приведен на рис. 7.6. Кривая зависимости S_τ от H_τ и график зависимости истинной продольной проводимости S от глубины H , построенный по данным каротажа, имеют одинаковую форму. Выделенные по этим графикам границы слоев достаточно хорошо согласуются – разница в их глубинах

не превышает 25-30 м, т. е. составляет не более 10 %. В интервале глубин 400-600 м отчетливо выделяются три слоя – два относительно плохо проводящих и заключенный между ними, слой низкого сопротивления небольшой мощности.

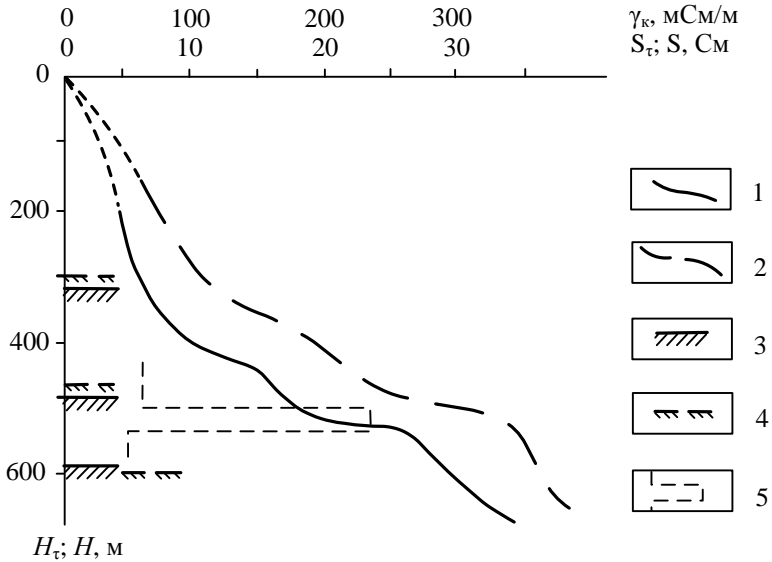


Рис. 7.6. Сопоставление зависимостей $S_\tau(H_\tau)$ по ЗСБ и $S(H)$ по данным каротажа (по В. А. Сидорову):
 1 – график $S_\tau(H_\tau)$; 2 - график $S(H)$; 3 – кровли проводящих слоев, выделяемых по данным ЗСБ; 4 – то же по данным каротажа; 5 – график γ_k (построен автором по графику S_τ)

Зависимость между S_τ и H_τ позволяет оценить кажущееся значение удельного сопротивления отдельного слоя или любого участка разреза. Для этого надо определить разность кажущихся глубин $\Delta H_\tau = H_{\tau 2} - H_{\tau 1}$ и соответствующую этому интервалу разность кажущихся продольных проводимостей $\Delta S_\tau = S_{\tau 2} - S_{\tau 1}$. Кажущееся удельное сопротивление интервала определяется по очевидной формуле:

$$\rho_k = \frac{1}{\gamma_k} = \frac{\Delta H_\tau}{\Delta S_\tau}. \quad (7.20)$$

В рассматриваемом примере в верхнем из указанных выше слоев с $\Delta H_{\tau}=500-430=70$ м приращение кажущейся продольной проводимости $\Delta S_{\tau}=4,2$ См. Вычисленная по формуле (7.20) кажущаяся удельная электропроводность $\gamma_k=1/\rho_k=60$ мСм/м (на низкоомных разрезах дифференциация по γ более четкая, чем по ρ). Нижний слой с $\Delta H_{\tau}=595-535=60$ м и $\Delta S_{\tau}=3$ См имеет $\gamma_k=50$ мСм/м. Заключенный между этими двумя слоями хорошо проводящий слой имеет кажущуюся мощность $\Delta H_{\tau}=535-500=35$ м и приращение кажущейся продольной проводимости $\Delta S_{\tau}=8$ См. Его кажущаяся удельная электропроводность $\gamma_k=228$ мСм/м. Он хорошо выделяется на графике γ_k (рис. 7.6).

Выше $H_{\tau}=430$ м границы слоев выделяются нечетко. Повидимому в этой части разреза происходит постепенное изменение удельного сопротивления с глубиной. В таких случаях γ_k можно оценивать для интервалов, не привязанных к границам слоев. В приведенном на рис. 7.6 примере в тридцатиметровых интервалах 315-345 м и 400-430 м γ_k равна соответственно 30 и 130 мСм/м. Определив поинтервальные значения γ_k по всему разрезу, можно построить непрерывный график зависимости γ_k от глубины. В случае профильных наблюдений можно построить разрез γ_k в изолиниях.

Возможность определения кажущейся продольной проводимости отдельного слоя позволяет при благоприятных условиях выявлять малоамплитудные структуры, не выделяющиеся при интерпретации кривых ρ_{τ} . Если проводящий слой залегает на опорном горизонте высокого сопротивления, изменение S_{τ} этого слоя отражает изменение его мощности, которое может соответствовать изменению глубины до опорного горизонта. Такой пример приведен на рис. 7.7. На участке (Нижнее Поволжье) из-за сложных сейсмогеологических условий сейсморазведка не дала надежных результатов. По двум пробуренным скважинам вырисовывалось моноклиналиное залегание пород. По ЗСБ выявилась область уменьшения продольной проводимости слоя проводящих терригенных отложений девона, залегающих на фундаменте. Это было истолковано, как уменьшение мощности девонских отложений в своде поднятия фундамента.

Пробуренные затем проверочные скважины установили наличие поднятия с амплитудой около 50 м при глубине до фундамента более 3 км (см. рис. 7.7).

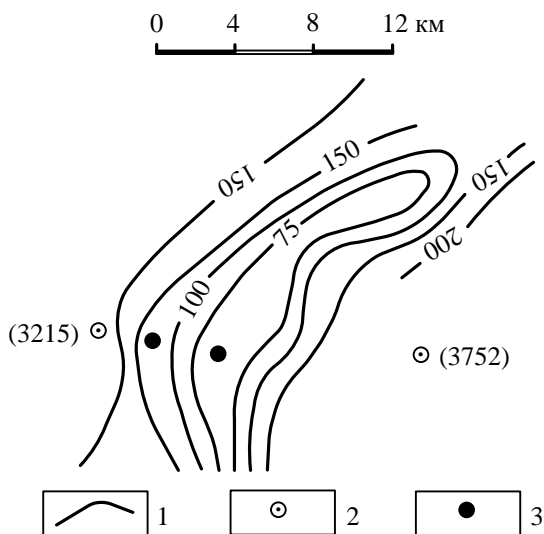


Рис. 7.7. Результаты ЗСБ над малоамплитудным поднятием фундамента (по В. А. Сидорову):

1 – изолинии S_{τ} проводящего слоя; 2 – скважины, пробуренные до проведения работ ЗСБ (в скобках – глубины до фундамента); 3 – проверочные скважины

Чтобы получить качественную картину геоэлектрического разреза по профилю, как и в других видах зондирования строят разрезы (вертикальные карты) определяемых величин. Можно строить разрезы кажущегося сопротивления ρ_{τ} или кажущейся продольной проводимости S_{τ} . По вертикальной оси откладывают кажущуюся глубину H_{τ} , а когда есть возможность определить соотношение между H_{τ} и истинной глубиной H – истинную глубину. Фрагмент разреза S_{τ} приведен на рис. 7.8, а. Для того же интервала глубин разрез γ_k приведен на рис. 7.8, б. Сопоставляя эти рисунки, можно видеть, что существенных противоречий между разрезами нет. Но разрез γ_{τ} дает более наглядную и детальную картину геоэлектрического строения.

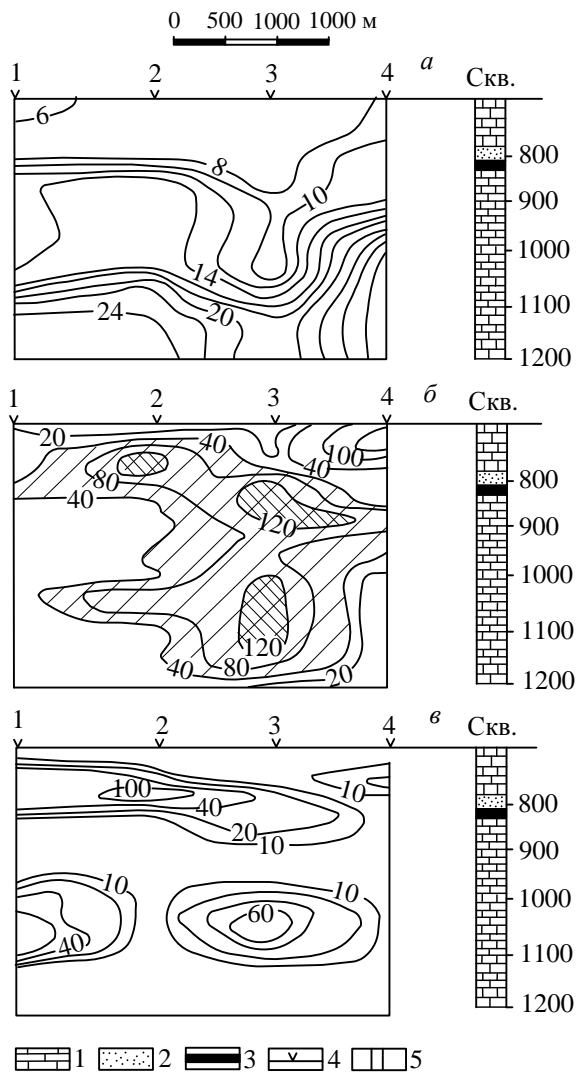


Рис. 7.8. Пример результатов ЗСБ (по материалам ВНИИГИС):
 а – разрез S_z ; б - разрез γ_K ; в – разрез интенсивности поляризационного процесса, усл. ед.
 1 – известняки и доломиты; 2 – аргиллиты и песчаники; 3 – то же нефтенасыщенные; 4 – положение точек ЗСБ; 5 – ствол скважин

Например, в верхней части разреза γ_k отчетливо проявляется проводящий слой, протягивающийся через весь профиль (его можно ограничить изолиниями с отметками 40 мСм/м). На разрезе S_τ отмечается только нижняя его часть, а на пикете 4 он как будто замещается плохо проводящим слоем в интервале глубин 770-870 м. На разрезе γ_k видно, что этот слой здесь погружается и наблюдается в интервале 860-900 м. Над ним выявляется заходящий с востока и выклинивающийся между пикетами 4 и 3 слой повышенного сопротивления, над которым в этом же интервале профиля располагается другой проводящий слой в интервале глубин 700-770 м. Вероятно, плохо проводящий интервал соответствует прослойке нефтесодержащих пород, встреченных скважиной.

Петлеобразному изгибу вниз изолинии S_τ с отметкой 10 См на пикете 3 соответствует относительное понижение электропроводности в промежутке между сближенными изолиниями γ_k с отметками 80 мСм/м на глубине 910-930 м. Ниже γ_k снова увеличивается, превышая 100 мСм/м. Эта область распространяется в виде слоя небольшой мощности на запад почти до пикета 1. В нижней части приведенного фрагмента разреза и по S_τ и по γ_k видно увеличение сопротивления пород, но на разрезе γ_k оно проявляется более отчетливо.

Переходный процесс становления поля протекает по экспоненциальному закону (точнее это сумма нескольких экспонент). После выключения тока в генераторном контуре измеряемая э. д. с. должна монотонно и плавно уменьшаться. Но на практических переходных характеристиках нередко наблюдаются искажения их нормального хода. Иногда на отдельных участках характеристики наблюдается даже рост измеряемой э. д. с. Эти искажения, если они не связаны с погрешностью измерений, объясняют влиянием вызванной поляризации.

В миллисекундном диапазоне причиной вызванной поляризации могут быть те же процессы, что и в РСВП, а при еще больших временах – процессы, которые изучают в обычном методе вызванной поляризации.

Искажения в микросекундном диапазоне, достигающие значительной амплитуды, полагают связанными с индукционной вызванной поляризацией (ВПИ). Эти явления, наблюдающиеся при временах в десятки микросекунд, нельзя связывать с обычной вызванной поляризацией, проявляющейся при временах от десятых долей миллисекунды до десятков минут (ее причиной является перегруппировка ионов в жидкой фазе породы и перенапряжение двойного электрического слоя на границе фаз). Полагают, что причиной ВПИ являются емкостные процессы в породах, содержащих тонкие пленки, отличающиеся по сопротивлению и диэлектрической проницаемости. Такими пленками могут быть, например, пленки углеводородов.

В настоящее время не существует точных способов разделения переходного процесса становления поля и переходного процесса вызванной поляризации. Для приближенного выделения ВПИ пытаются использовать отклонения переходной характеристики от спокойного монотонного хода. Эти отклонения более заметны на производных переходной характеристики, которые находят приближенными способами, так как уравнение переходной характеристики неизвестно.

Пример результатов выделения ВПИ приведен на рис. 7.8, *в*. На разрезе выделяется слой повышенной интенсивности ВПИ, совпадающий с описанным выше слоем высоких значений γ_k . Возможно, он отмечает горизонт нефтесодержащих пород, пересеченный скважиной. На несколько большей глубине выделяется не сплошной слой с меньшей интенсивностью ВПИ, также совпадающий со слоем повышенной проводимости (см. рис. 7.8, *б*, *в*).

7.5. Метод переходных процессов и его модификации

Основной модификацией МПП в настоящее время является однопетлевой вариант или равнозначный ему по результатам вариант с совмещенными петлями. В этой модификации обнаруживаются локальные проводящие объекты, расположенные под петлей, но выполнить их детальное изучение нельзя.

Для более точного определения положения объектов в плане, их глубины и элементов залегания используется модификация с автономной приемной рамкой (детализационный вариант). В случае отсутствия аномалий от локальных объектов эти модификации позволяют оценить продольную проводимость слоя наносов или эффективное удельное сопротивление среды.

В некоторых случаях может быть применено профилирование с дипольной установкой, в которой генераторная и приемная рамки синхронно перемещаются по профилю. Так как первичное поле в дипольной установке имеет малую интенсивность и быстро затухает по профилю, эта модификация может применяться только при поисках проводящих объектов, залегающих на небольшой глубине в породах высокого сопротивления.

Метод переходных процессов применяется также в скважинном варианте, когда генераторная петля располагается около устья скважины, а измерения выполняются в скважине. Чтобы можно было определить положение возмущающего объекта относительно скважины, измерения должны быть трехкомпонентными.

В аэроварианте генераторная петля монтируется на корпусе вертолета, а измерительная – на буксируемой гондole.

7.6. Аномалии от локальных проводящих объектов в среде с высоким сопротивлением

Рассмотрим аномалию от локального проводящего объекта, полагая что вмещающая среда имеет высокое сопротивление и вихревые токи в ней практически отсутствуют. В этом случае измеренная в приемном контуре э. д. с. ε определяется выражением:

$$\frac{\varepsilon}{I} = K\alpha \sum_{n=1}^{\infty} e^{-m_n \alpha t}, \quad (7.21)$$

где I – сила тока в генераторном контуре; K – коэффициент, зависящий от размеров и взаимного расположения контуров и объекта; m_n – коэффициент, зависящий от формы объекта и по-

рядкового номера члена ряда. Параметр α , определяемый формулой (7.3), зависит от размера объекта и его электромагнитных свойств.

Из формулы (7.21) следует, что при малых значениях времени t , когда аргумент экспоненциальной функции мал, амплитуда измеряемого сигнала примерно пропорциональна параметру α . Она тем больше, чем меньше абсолютная электропроводность и размер проводящего объекта. При больших t основное влияние на амплитуду сигнала оказывает экспоненциальная функция, которая при прочих равных условиях тем больше, чем меньше параметр α , т. е. чем больше электропроводность и размер объекта. Поэтому скорость затухания аномалии от локального проводящего объекта определяется величиной параметра α . При больших значениях α аномалия имеет большую интенсивность при малых временах, но с увеличением t быстро затухает. Для объектов, характеризующихся малыми значениями α , напротив, при малых временах аномалия может иметь меньшую интенсивность, но она сохраняется до относительно больших значений t (рис. 7.9). Это является основой для классификации аномалий по переходной характеристике – зависимости интенсивности аномалии от времени t .

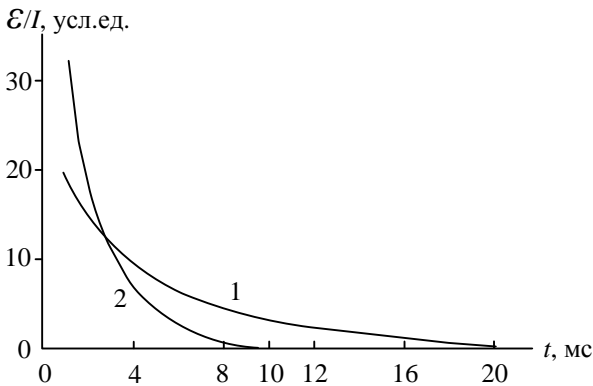


Рис. 7.9. Переходные характеристики для проводящего шара, при $\alpha=10 \text{ с}^{-2}$ (1); $\alpha=50 \text{ с}^{-1}$ (2)

Из переходных характеристик, приведенных на рис. 7.9, следует, что при поисках достаточно крупных массивных рудных тел, обладающих высокой электропроводностью и значительными размерами и поэтому характеризующихся небольшими значениями параметра α , надо обращать внимание на аномалии, сохраняющиеся до достаточно больших значений времени t . Быстро затухающие аномалии в этом случае обычно бывают вызваны различными объектами, не представляющими интереса. Таким образом, в первом приближении классификация аномалий может производиться уже в процессе измерений.

Для более уверенной классификации аномалий можно определять величину параметра α , а потом, используя формулу (7.3), оценить величину произведения γa^2 . Для определения параметра α существуют асимптотические способы и способ обобщенной переходной характеристики.

В асимптотических способах используется конечная часть переходной характеристики. Они основаны на том, что коэффициент формы m_n , быстро убывает с увеличением порядкового номера членов ряда. Например, для шара $m_n = (\pi n)^2$. В этом случае $m_1 = 9,87$, $m_2 = 39,5$, $m_3 = 88,8$ и т. д. Поэтому при достаточно больших t модуль аргумента экспоненциальной функции при $n > 1$ становится большим и функция приобретает пренебрежимо малую величину. Это позволяет в формуле (7.21) ограничиться первым членом ряда и для больших t записать выражение для измеряемой э. д. с. в виде:

$$\mathcal{E} / I \approx K \alpha e^{-mat} . \quad (7.22)$$

Прологарифмировав это выражение, получим:

$$\lg(\mathcal{E} / I) = \lg(K\alpha) - mat \cdot \lg e = \lg(K\alpha) - ct,$$

уравнение прямой линии с угловым коэффициентом $c = -ma \cdot \lg e$. Определив угловой коэффициент, можно вычислить

$$\alpha = \frac{|c|}{m \cdot \lg e} . \quad (7.23)$$

Другой асимптотический способ определения α основан на вычислении производной от переходной характеристики. Так как уравнение реальной переходной характеристики не извест-

но, можно воспользоваться графическим дифференцированием. Продифференцировав выражение (7.22) и решив полученное уравнение относительно α , получим:

$$\alpha = \frac{1}{m} \left| \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathcal{E}}{I} \right) \right| / \frac{\mathcal{E}}{I}. \quad (7.24)$$

Подробно асимптотические способы определения параметра α рассмотрены в разделе 12.4 работы [1, часть 2].

Более надежно параметр α определяется по обобщенной переходной характеристике, особенно это относится к случаям, когда нет уверенного выхода переходной характеристики на асимптоту. Кроме того на обобщенной переходной характеристике лучше видно влияние геоэлектрических помех. Практическая обобщенная переходная характеристика – это построенная в двойном логарифмическом масштабе зависимость произведения $t \cdot \frac{\mathcal{E}}{I}$ от времени t .

Теоретическая обобщенная переходная характеристика представляет собой зависимость функции $\tau \sum_{n=1}^{\infty} e^{-m_n \tau}$ от $\tau = \alpha t$. Графики теоретической и практической обобщенных переходных характеристик в логарифмическом масштабе имеют одинаковую форму, но смещены один относительно другого по осям координат. Поэтому теоретическую кривую можно использовать как палетку для определения α . Для этого практическая кривая зависимости $\frac{\mathcal{E}}{I} t$ от t накладывается на палетку и совмещается с одной из теоретических кривых (на палетке две кривые, рассчитанные для двух моделей объекта – шара и горизонтального цилиндра). Затем для произвольного t определяют соответствующее ему τ и находят параметр α по очевидной формуле:

$$\alpha = \frac{\tau}{t}. \quad (7.25)$$

Палетка и пример определения по ней параметра α приведены на рис. 7.10. В этом примере обобщенная переходная характеристика, построенная для интервала времени 3,5–12,5 мс хорошо совмещается с палеточной кривой для шара. При их совме-

нии значению $\tau=10^{-1}$ соответствует $t=3,2 \text{ мс}=3,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. По этим данным определяется параметр $\alpha=32 \text{ с}^{-1}$. Такое значение параметра характерно для проводящих объектов средних размеров.

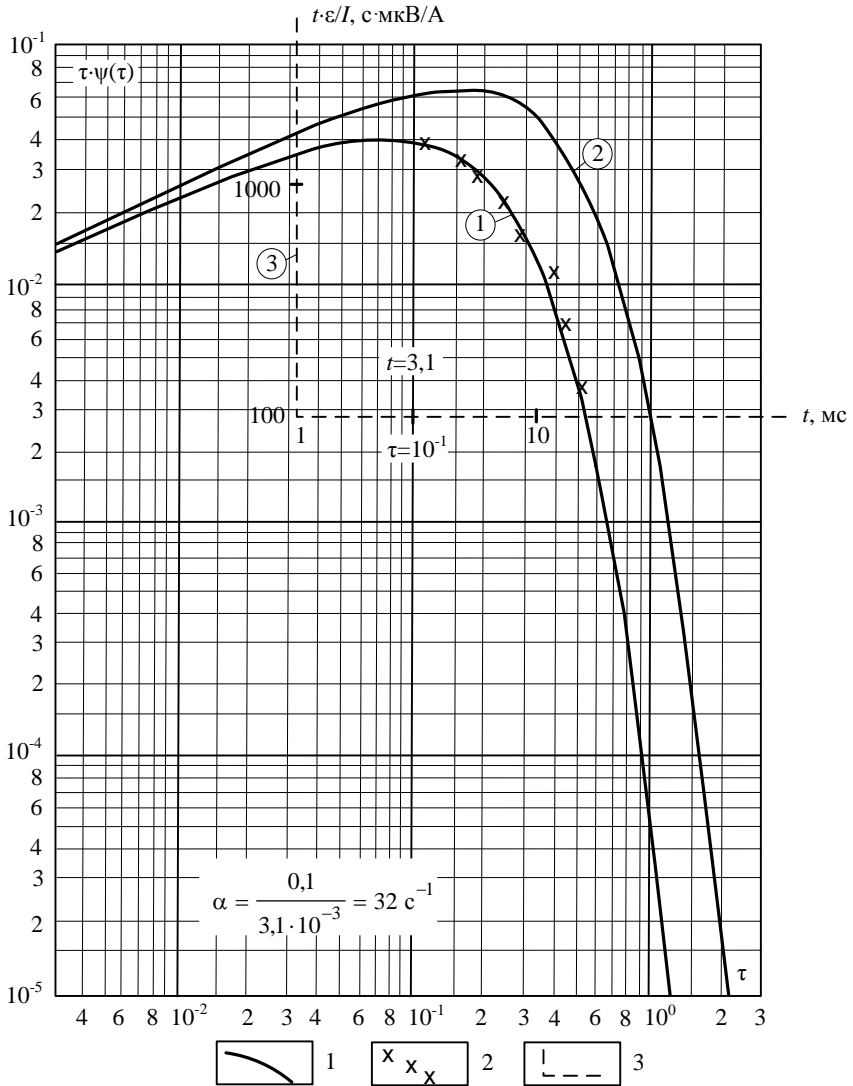


Рис. 7.10. Палетка для определения параметра α по обобщенной переходной характеристике [12] и пример интерпретации:
1 – шар; 2 – горизонтальный круговой цилиндр.

⓪ – кривые палетки; Ⓛ – точки интерпретируемой переходной характеристики (Тарньерское месторождения, Северный Урал); Ⓧ – координатные оси интерпретируемой переходной характеристики

Этот вывод согласуется с данными разведки Тарньерского месторождения. В разрезе рудное тело имеет размеры 300x70 м. Приняв средний поперечник равным 185 м, получим среднее значение радиуса $a_{\text{ср}} \approx 92$ м. Приняв это значение радиуса и электропроводность $\gamma = 10$ См/м, получим $\alpha = 37$ с⁻¹, т. е. величину, близкую к определенной по палетке.

7.7. Оценка параметров вмещающей среды. Влияние вмещающей среды на аномалии от локальных объектов

В реальных условиях случаи, когда вмещающая среда имеет очень высокое сопротивление и не оказывает влияния на результаты МПП, встречаются не часто. Обычно сопротивление среды не очень велико и поле возникающих в ней вихревых токов суммируется с полем от токов в локальных объектах, искажая аномалии от этих тел. В таких случаях необходимо оценивать и учитывать влияние вмещающей среды при интерпретации аномалий. С другой стороны на участках, где аномалии от локальных объектов отсутствуют, данные об электрических параметрах среды могут представлять интерес для решения задач геологического картирования.

При рассмотрении влияния вмещающей среды на результаты МПП можно ограничиться двумя простыми ее моделями: однородное проводящее полупространство с удельным сопротивлением ρ и непроводящая среда, перекрытая слоем с продольной проводимостью S . Для названных моделей рассчитаны палетки. Модель среды выбирается в зависимости от того, с кривыми которой палетки лучше совмещается интерпретируемая обобщенная переходная характеристика.

Палетка S - m - P для определения продольной проводимости верхнего слоя (сопротивление подстилающих пород в этом случае принимается бесконечно большим) приведена на рис. 7.11. Параметр кривых m – отношение длин сторон петли. Сим-

вол P означает, что палетка предназначена для интерпретации результатов поискового, т. е. однопетлевого варианта МПП. В шифре палеток для интерпретации результатов варианта с авто-

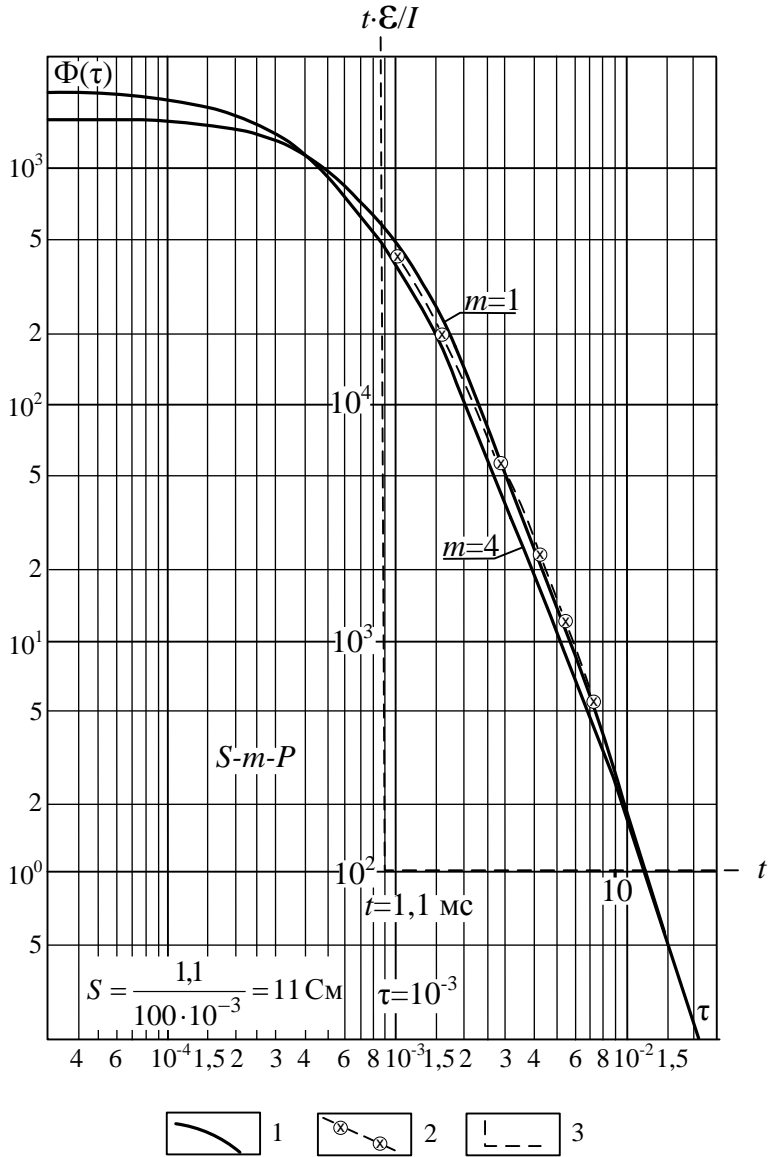


Рис. 7.11. Палетка для определения продольной проводимости верхнего слоя по обобщенной переходной характеристике [12] и пример интерпретации: 1 – палеточные кривые (параметр кривых отношение сторон петли); 2 – интерпретируемая кривая ($L=100$ м); 3 – оси координат интерпретируемой кривой

номной приемной рамкой (детализационного) указан символ D .

При интерпретации обобщенная переходная характеристика накладывается на палетку так, чтобы значение $t \cdot \frac{\mathcal{E}}{I}$, численно равное половине стороны L квадратной петли (или корню из произведения половин сторон прямоугольной петли $\sqrt{L_1 L_2}$) соответствовало значению 10^0 на оси $\Phi(\tau)$ палетки. Перемещая бланк с интерпретируемой переходной характеристикой параллельно оси τ палетки, совмещают интерпретируемую кривую с палеточной кривой. Определяют значение t на оси интерпретируемой кривой, соответствующее произвольно выбранному значению τ на оси палетки. Продольная проводимость слоя вычисляется по формуле:

$$S = \frac{t/\tau}{L} \quad (7.26)$$

Значение времени t подставляется в формулу в миллисекундах.

В примере интерпретации, приведенном на рис. 7.11, значению $\tau=10^{-3}$ соответствует $t=1,1$ мс. Половина стороны петли $L=100$ м. По формуле (7.26) получается $S=11$ См. Интерпретируемая переходная характеристика получена на участке с мощностью рыхлых отложений $h_1=65$ м и сопротивлением $\rho_1=5,5$ Ом·м. Следовательно, продольная проводимость $S_1=11,8$ См, т. е. отличается от полученной при интерпретации меньше, чем на 10 %.

Если в качестве модели среды выбрано проводящее полупространство, для интерпретации используется палетка ρ - m - P (рис. 7.12). В этом случае со значением 10^0 на оси $F(\tau)$ палетки совмещают значение $t \cdot \frac{\mathcal{E}}{I}$ на оси интерпретируемой кривой, численно равное корню из суммы квадратов половин стороны петли $\sqrt{L_1^2 + L_2^2}$ (для квадратной петли $L\sqrt{2}$). В остальном ин-

терпрегация выполняется так же, как по палетке S . Удельное сопротивление среды вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{\tau}{t} \left(L_1^2 + L_2^2 \right). \quad (7.27)$$

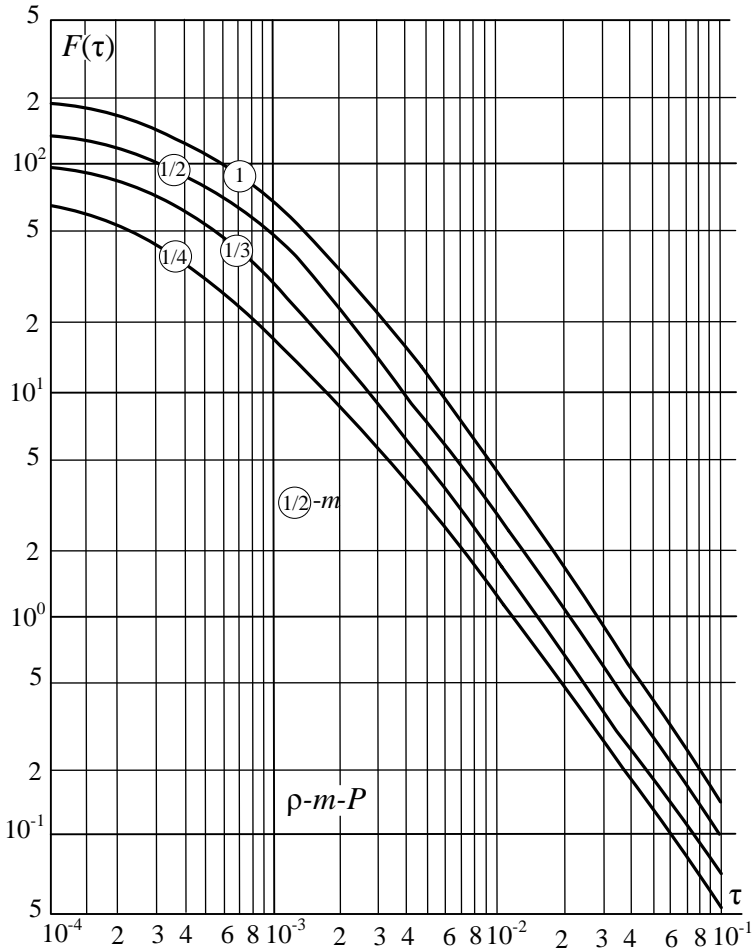


Рис. 7.12. Палетка для определения удельного сопротивления среды по обобщенной переходной характеристике [12]:
параметр кривых – отношение длин сторон петли

Если локальный проводящий объект залегает в породах относительно низкого удельного сопротивления или под слоем

проводящих наносов, измеряемая переходная характеристика отражает суммарное влияние объекта и вмещающей среды. В этом случае для приближенного разделения аномалий от вмещающей среды и объекта используется различная скорость затухания аномалий от них. Если влияние вмещающей среды не слишком велико, аномалия от нее затухает значительно быстрее, чем аномалия от хорошего локального проводника. На обобщенной переходной характеристике момент, когда влияние локального объекта начинает существенно преобладать над влиянием вмещающей среды, отмечается перегибом кривой. Если этот перегиб достаточно хорошо выражен, по части характеристики после перегиба можно оценить параметр объекта.

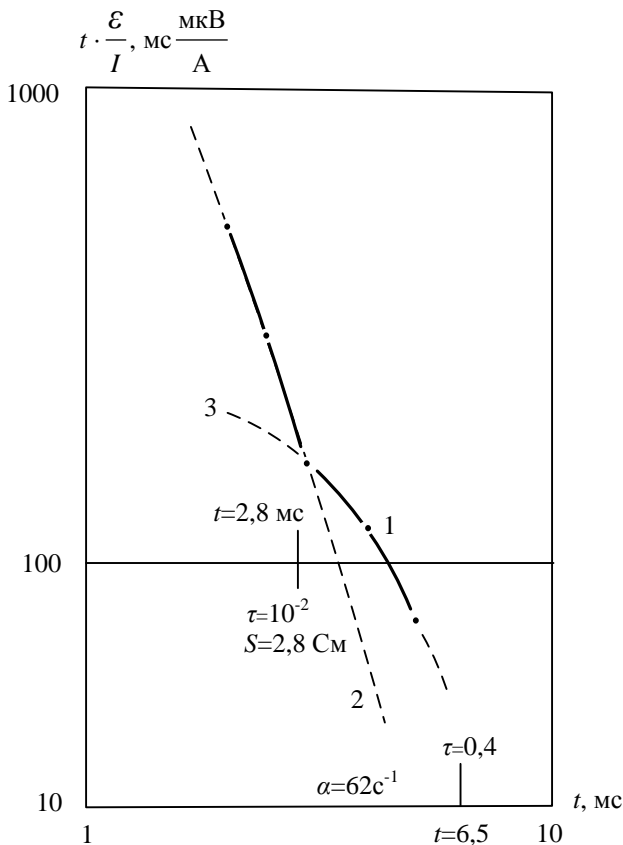


Рис. 7.13. Пример интерпретации переходной характеристики в условиях влияния слоя наносов (Молодежное месторождение, Челябинская область): 1 – наблюдаемая переходная характеристика ($L=100 \text{ м}$); 2 – палеточная кривая $S-m-P(1)$; 3 – палеточная кривая α

На рис 7.13 показана интерпретация обобщенной переходной характеристики, полученной над одним из рудных тел Молодежного месторождения (Челябинская область). Измерения выполнены с петлями $200 \times 200 \text{ м}$. Рыхлые отложения имеют на участке мощность около 40 м и удельное сопротивление порядка $15 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Первые три точки обобщенной переходной характеристики лежат практически на прямой линии. Этот участок хорошо совмещается с кривой 1 палетки $S-m-P$. Полученная при

интерпретации продольная проводимость верхнего слоя равна 2,8 См. На третьей точке переходная характеристика имеет резкий изгиб. Последующая часть переходной характеристики совмещается с кривой для шара палетки α . Полученное при интерпретации значение параметра $\alpha=62 \text{ с}^{-1}$. Такие значения характерны для мелких рудных тел, что согласуется с данными разведки месторождения.

Описанный способ разделения аномалий от объекта и вмещающей среды возможен, когда влияние среды не слишком велико. При сильном влиянии вмещающей среды перегиб на обобщенной переходной характеристике сглаживается и выделение аномалии от локального объекта становится сложным, а оценка параметра α невозможной. При очень сильном влиянии вмещающей среды может оказаться невозможным само установление наличия аномалии по переходной характеристике.

Все способы интерпретации результатов МПП, описанные выше применительно к поисковому (однопетлевому) варианту МПП, применимы и к интерпретации аномалий, полученных при работе с автономной приемной рамкой (детализационный вариант). Для определения параметра α используется та же палетка (см. рис. 7.10). Для определения S верхнего слоя или ρ однородного полупространства применяются палетки S - n - D и ρ - n - D . Символ D указывает, что палетка предназначена для детализационного варианта. Средний символ – число, указывающее в какой зоне петли применима палетка. Площадь петли разделена на три зоны: внутреннюю (1), среднюю (2) и внешнюю (3). Эти зоны показаны на палетках.

Определение продольной проводимости по палетке S производится так же, как и в случае поискового варианта. Определение удельного сопротивления полупространства отличается тем, что при вычислении ρ вводится коэффициент, зависящий от зоны и от отношения сторон петли. Палетки для детализационного варианта МПП и правила пользования ими можно найти в работе [12].

7.8. Выделение аномалий от локальных объектов

при сильном влиянии вмещающей среды.

Зондирование методом переходных процессов

Аномалии от локальных проводящих объектов на фоне сильного влияния вмещающей среды могут быть выделены более уверенно, если использовать эффект зондирования. При увеличении времени t увеличивается глубина проникновения электромагнитного поля. Поэтому при малых значениях времени измеряемый сигнал определяется электромагнитными свойствами верхней части разреза. По мере увеличения времени на результаты измерений начинают оказывать влияние геоэлектрические неоднородности, залегающие на большей глубине. На этом основано зондирование методом переходных процессов – ЗМПП. Принцип и практическая реализация этого метода не отличается от ЗСБ. Различия при поисках локальных объектов по сравнению с решением структурных задач есть лишь в некоторых подходах к интерпретации результатов. Таким образом, ЗМПП является связующим звеном между МПП и ЗСБ.

Простейшим способом реализации эффекта зондирования в МПП является построение графиков зависимости от времени t кажущейся удельной электропроводности γ_{τ} или кажущегося сопротивления ρ_{τ} . На рис. 7.14, *a* приведены графики γ_{τ} и ρ_{τ} для участка, где нет локальных неоднородностей и среду можно считать двухслойной. Верхний слой имеет мощность 65 м и удельное сопротивление 5,5 Ом·м. Графики построены по тем же данным, что и практическая обобщенная переходная характеристика на рис. 7.11.

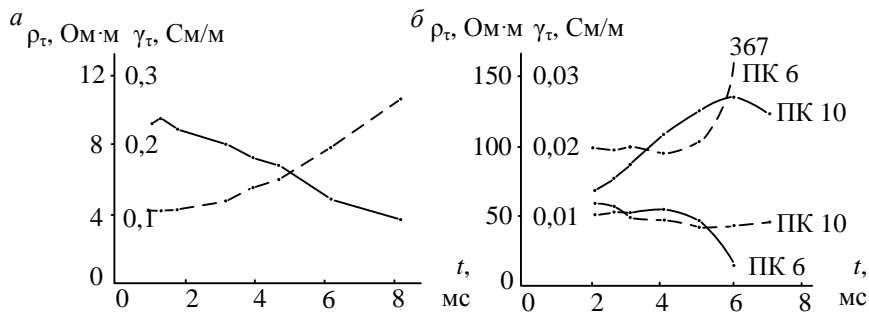


Рис. 7.14. График зависимости γ_τ (сплошные линии) и ρ_τ (штриховые линии от времени t):

a – двухслойная среда без локальных неоднородностей, $h_1=65$ м, $\rho_1=5$ Ом·м; b – участок Озерного месторождения (см. геологический разрез на рис. 7.15, z)

При первых трех значениях t от 1,1 до 1,8 мс γ_τ и ρ_τ практически не меняются. При этих временах глубина исследования не превышает мощности верхнего слоя и результаты измерений определяются удельным сопротивлением этого слоя. В дальнейшем при увеличении t начинают оказывать влияние подстилающие породы высокого сопротивления. Это приводит к монотонному убыванию γ_τ и росту ρ_τ . Такой вид зависимостей γ_τ и ρ_τ от t следует считать нормальным, свидетельствующим об отсутствии в пределах петли локальных проводящих объектов.

Зависимости, показанные на рис. 7.14, b , получены на участке Озерного колчеданного месторождения (Челябинская область). На удаленном от рудного тела пикете 6 характер графиков в принципе аналогичен приведенным в предыдущем примере, поэтому можно полагать, что геоэлектрический разрез здесь также соответствует двухслойной модели. Иная картина наблюдается на расположенном над рудным телом пикете 10. Здесь с увеличением времени значения γ_τ быстро растут, достигают максимума при $t=6$ мс, после чего наблюдается небольшое уменьшение кажущейся электропроводности. Резкий рост γ_τ с увеличением t позволяет уверенно судить о наличии хорошо проводящего объекта на глубине. График ρ_τ является зеркальным отражением графика γ_τ , но аномалия на нем менее выразительна.

Если наблюдения выполнены по профилю, пересекающему аномалию, можно построить разрез ρ_τ или γ_τ аналогично тому, как по результатам ВЭЗ строятся разрезы ρ_k . Только в случае ЗМПП по вертикали вместо $AB/2$ откладываются значения времени t . На таких разрезах особенности геоэлектрического строения отображаются наиболее наглядно. Выше были описаны зависимости γ_τ и ρ_τ от времени t на двух пикетах профиля, проходящего над Озерным месторождением. На рис. 7.15,

б приведен разрез ρ_τ . Там же показаны графики \mathcal{E}/I и геологический разрез. На разрезе после $t=2$ мс над рудным телом наблюдается область пониженных значений ρ_τ . Рудное тело рассечено дайкой габбродиабазов, имеющих высокое сопротивление, на три блока (см. рис. 7.15, з). Судя по разрезу ρ_τ аномалия вызвана западным, самым крупным блоком, над которым и располагается центр области низких ρ_τ . Влияние двух других блоков, имеющих незначительные размеры, практически не проявляется.

Показанная на рис. 7.15, б вертикальная карта ρ_τ позволяет уверенно судить о том, что вызвавший аномалию объект находится на некоторой глубине и определить его положение относительно профиля. Но оценить количественно глубину до объекта по этому разрезу нельзя, так как положение аномалии по вертикали на разрезе зависит от масштаба времени на оси t . При изменении масштаба t аномалия перемещается по вертикали.

Оценку глубины до объекта можно сделать, если рассчитать кажущуюся глубину и на вертикальной оси откладывать ее величину. Для рассматриваемого профиля такой разрез ρ_τ приведен на рис. 7.15, в. На этом разрезе над рудным телом в интервале H_τ 130–150 м наблюдается сгущение изолиний ρ_τ . Это сгущение наблюдается при H_τ , близкой к глубине верхней кромки рудного тела, отмечая ее положение. Это объясняется тем, что в хорошо проводящем рудном теле эффективная глубина при увеличении времени t растет медленно, поэтому значения ρ_τ , измеренные при разных t , приписываются близким значениям H_τ .

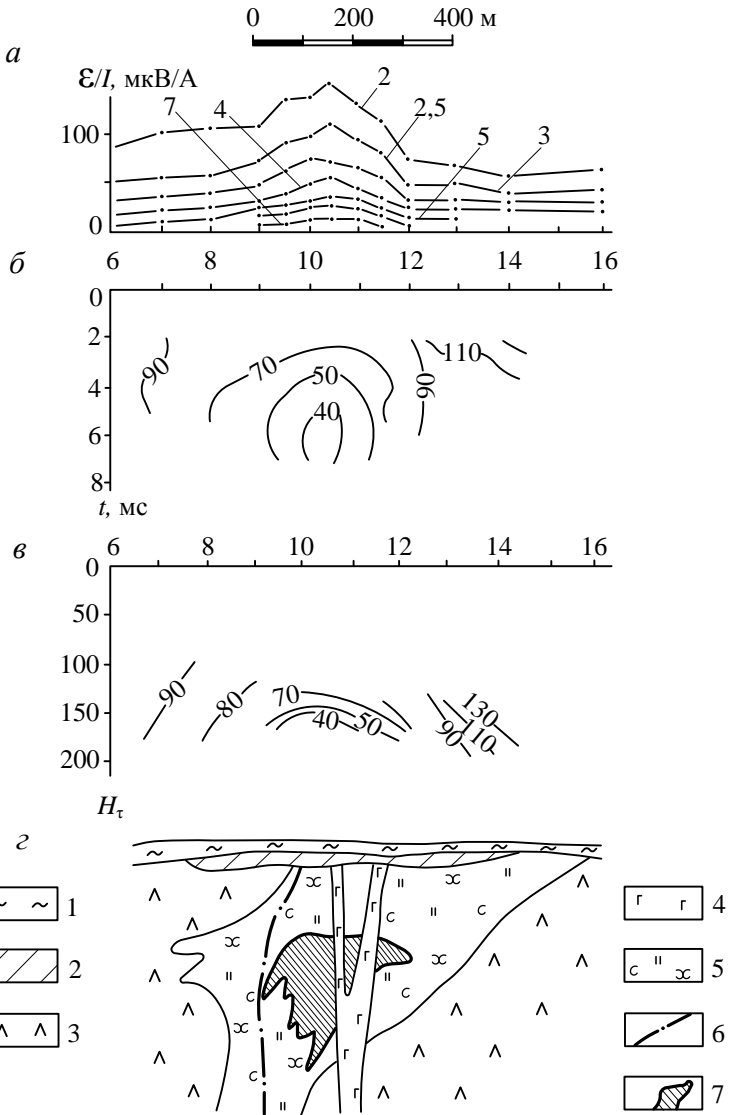


Рис. 7.15. Результаты МПП на Озерном колчеданном месторождении (Челябинская область):

a – графики E/I (по А. Ф. Сухорукову), цифры у графиков – время измерения t , мс; *б* – разрез $\rho_t(t)$; *в* – разрез $\rho_t(H_t)$; *г* – схематизированный геоэлектрический разрез.

1 – рыхлые отложения; 2 – кора выветривания; 3 – дацитовые порфириды; 4 – габбродиабазы; 5 – гидротермально измененные породы; 6 – тектоническое нарушение; 7 – колчеданные руды

Из рис. 7.15, *в* следует, что в данном случае диапазон времени t , в котором выполнены измерения, для получения полной картины геоэлектрического разреза недостаточен. Чтобы получить представление о верхней части разреза, необходимы результаты измерений при t меньших 2 мс. Для получения информации о более глубокой, чем верхушка рудного тела, части разреза, необходимы результаты измерений при t значительно больших, чем 7 мс. Поэтому при выполнении ЗМПП измерения следует выполнять в максимально возможном диапазоне t .

Результаты ЗМПП позволяют надежно разделять аномалии от проводящих объектов, залегающих на глубине, и от приповерхностных проводящих неоднородностей типа карманов наносов, карстовых воронок и т. п. В последнем случае область пониженных ρ_{τ} начинается с самых малых значений t и постепенно затухает с течением времени. Характер разреза ρ_{τ} над таким объектом показан на рис. 12.13 в работе [1, часть 2].

7.9. Детализационные исследования методом переходных процессов

Детализационные исследования МПП могут выполняться как в наземном, так и в скважинном вариантах. В обоих случаях измерения выполняются с автономной приемной рамкой.

Наземные исследования (рамочно-петлевой вариант). В этой модификации электромагнитное поле создается с помощью незаземленной петли, как в однопетлевом варианте метода. Измерения производятся с помощью измерительной многовитковой рамки небольших размеров, перемещающейся по системе профилей внутри петли или выходящих на некоторое расстояние за ее пределы. Так как измерения в МПП выполняются в паузах между токовыми импульсами, они возможны в непосредственной близости от проводов петли. В разных частях петли поле изменяется по величине и по направлению. Поведение векторов напряженности первичного поля в вертикальной плоскости, проходящей через среднюю часть петли, показано на рис. 7.16.

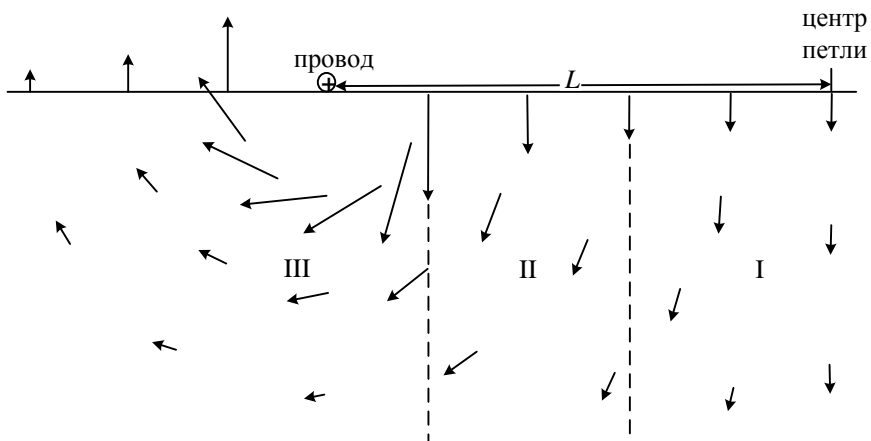


Рис. 7.16. Векторы напряженности первичного поля петли в вертикальной плоскости:
 штриховые линии – границы зон; I – центральная зона; II - промежуточная зона; III – внешняя зона (зона провода)

В центральной части петли первичное поле близко к однородному. Оно ориентировано вертикально и относительно медленно затухает с глубиной. При удалении от центра петли поле становится наклонным. Его напряженность в верхней части разреза несколько возрастает, но с глубиной поле затухает быстрее, чем в средней части петли. Вблизи провода поле ориентировано субгоризонтально. У поверхности оно имеет большую интенсивность, но быстро затухает с глубиной. Соответственно выделяют три зоны: центральную – расстояние от центра петли до $0,4L$ (L – длина половины стороны петли), промежуточную – расстояние от центра $(0,4-0,8)L$ и внешнюю или зону провода – расстояние от центра больше $0,8L$ (см. рис. 7.16).

Описанное поведение первичного поля позволяет сделать вывод, что центральная зона благоприятна для выявления изометричных и полого залегающих проводящих объектов. Для выявления маломощных объектов с углом падения близким к 90° эта зона неблагоприятна. Для выявления таких объектов благо-

приятна зона провода, где ориентировка первичного поля близка к горизонтальной. Пологозалегающие маломощные объекты в зоне провода возбуждаются плохо и не могут вызвать интенсивных аномалий. Изометричные объекты хорошо выделяются в любой зоне.

Вид графиков вторичного поля над разрезом с горизонтальным проводящим слоем зависит от параметра $\tau_S = t/\mu SL$ (S – продольная проводимость слоя). Внутри петли измеряемый сигнал положительный (существует только вертикальная компонента поля). С внешней стороны проводов петли поле меняет знак и сигнал становится отрицательным. Переход через нуль и отрицательный экстремум наблюдаются тем дальше от петли, чем больше τ_S . Одновременно уменьшается амплитуда сигнала (рис. 7.17). Внутри петли при малых τ_S в центре наблюдается прогиб графика с максимумами по бокам. При увеличении τ_S прогиб пропадает и остается один максимум в центре петли. При приближении к проводам поле плавно уменьшается (см. рис. 7.17).

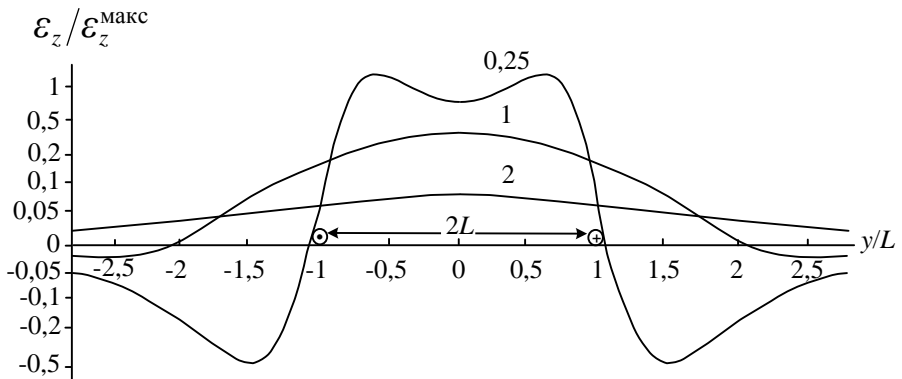


Рис. 7.17. графики значений в поле незаземленной петли размером $2L \times 2L$ на поверхности проводящего слоя [39]:
цифры у кривых – значения τ_S

Аналогичный вид имеют графики вторичного поля над проводящим полупространством. В этом случае их амплитуда и форма зависят от параметра $\tau_\gamma = t/\mu\gamma L^2$.

Рассмотрим вид аномалии от проводящего шара в центральной зоне. В этом случае вертикальная компонента поля имеет максимум над центром шара. В зависимости от глубины до объекта изменяется скорость затухания измеряемого сигнала при удалении от эпицентра аномалии (рис. 7.18). Ширина аномалии на уровне половины максимума равна глубине до центра шара.

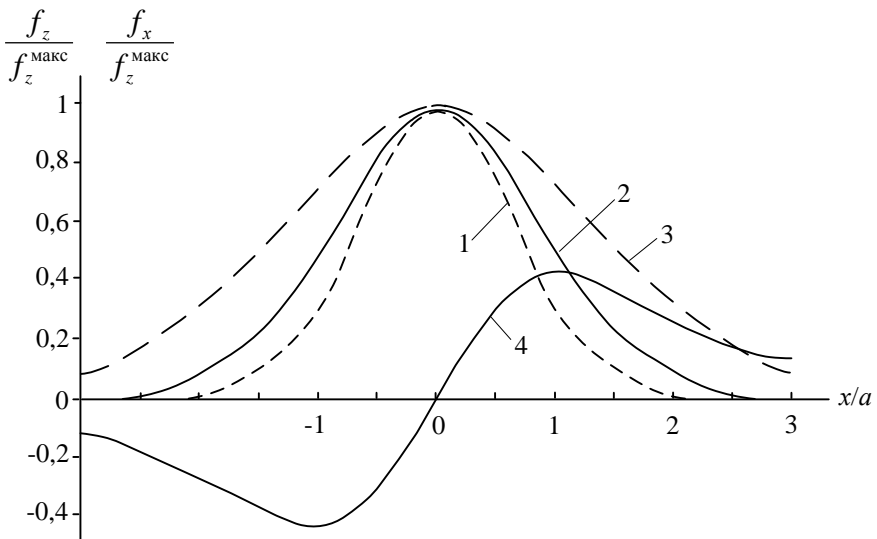


Рис. 7.18. Графики координатной функции сигнала, измеренного над шаром в центральной зоне петли:

1-3 – графики f_z при $h=1,5a$, $h=2a$, $h=3a$; 4 – график f_x при $h=2a$; a – радиус шара

Аномалия горизонтальной компоненты поля – знакопеременная с переходом через нуль над центром объекта. Расстояние между экстремумами равно глубине до центра шара.

Таким образом, аномалия от шара в центральной зоне идентична полю вертикального магнитного диполя, расположенного в центре шара.

Аналогичный вид имеет аномалия от горизонтального цилиндра, расположенного в центральной зоне (рис. 7.19, кривая 1). В зоне провода аномалия вертикальной компоненты становится знакопеременной с несимметричными положительным и отрицательным экстремумами (см. рис. 7.19, кривая 2). Такой же вид имеет в зоне провода и аномалия от шара. Различие вида аномалий от объектов с изометричным сечением в разных зонах объясняется разной ориентировкой первичного поля, что приводит к разной ориентировке плоскости растекания вихревых токов.

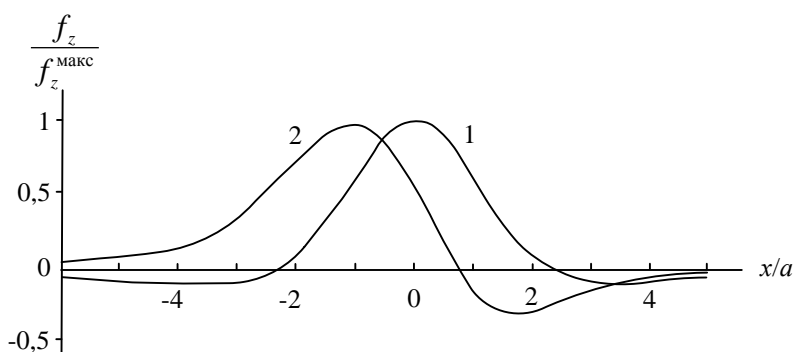


Рис. 7.19. Графики координатной функции f_z сигнала, измеренного над горизонтальным круговым цилиндром в центральной зоне петли (1) и в зоне кабеля (2) при $h=2a$ [18]

Над крутопадающими пластами небольшой мощности аномалия вертикальной составляющей знакопеременная с переходом через нуль вблизи проекции верхней кромки пласта. Смещение точки перехода через нуль в сторону меньшего экстремума пласта тем больше, чем больше глубина до объекта. Амплитуда аномалии больше со стороны падения пласта (рис. 7.20). Детали формы графика \mathcal{E}_z зависят от глубины залегания пласта, угла падения и соотношения между длиной пласта по падению $d_{\text{пад}}$ и по простиранию $d_{\text{пр}}$. Это дает возможность по

особенностям формы графиков делать оценки параметров пластов [18].

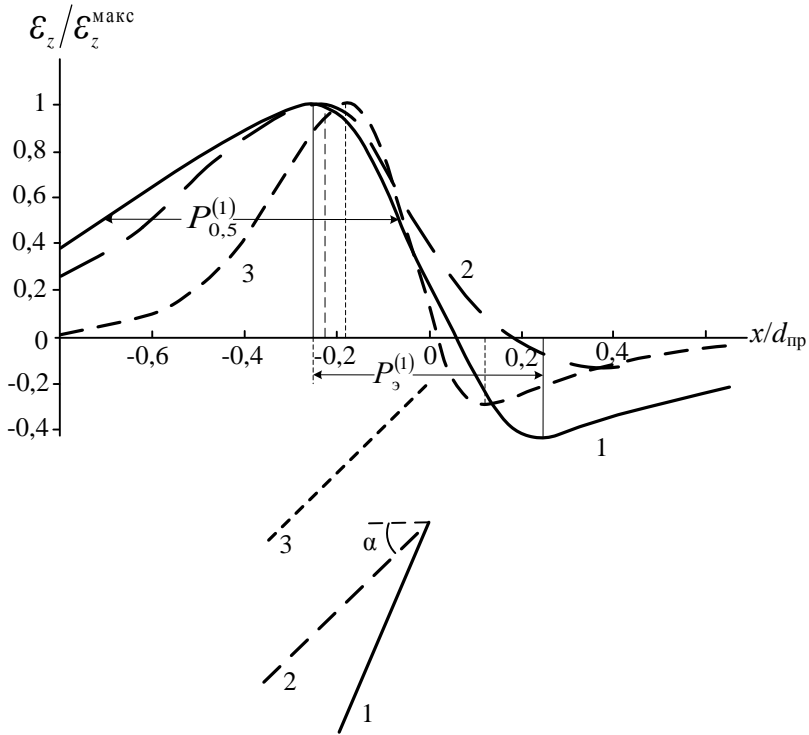


Рис. 7.20. Графики значений сигнала над тонким пластом при $d_{\text{пад}}/d_{\text{пр}}=0,5$ [18]:
 1 – $h=0,4d_{\text{пр}}$, $\alpha=70^\circ$; 2 – $h=0,4d_{\text{пр}}$, $\alpha=45^\circ$; 3 – $h=0,1d_{\text{пр}}$, $\alpha=45^\circ$

Для оценки параметров пласта можно использовать отношение амплитуд меньшего A_2 и большего A_1 экстремумов графика, отношение расстояния между экстремумами p_3 к длине пласта по простиранию, ширину $p_{0,5}$ более интенсивной ветви кривой на уровне полумаксимума, отношение $p_{0,5}/p_3$.

От угла падения в наибольшей степени зависит отношение амплитуд экстремумов. В приведенном на рис. 7.20 примере при угле падения 70° (кривая 1) $A_2/A_1 = 0,43$. При угле падения 45° A_2/A_1 равно 0,3 и 0,12 (кривые 2 и 3). Глубина залегания пласта оказывает наибольшее влияние на расстояние между экс-

тремумами. При $h=0,4d_{\text{пр}}$ отношение $p_3/d_{\text{пр}}$ составляет 0,5 и 0,625 (кривые 2, 3), а при $h=0,1d_{\text{пр}}$ это отношение равно 0,3. На соотношение $d_{\text{пад}}/d_{\text{пр}}$ оказывает заметное влияние величина $p_{0,5}/p_3$. Для всех приведенных на рис 7.20 кривых отношение $d_{\text{пад}}/d_{\text{пр}}=0,5$. Отношение $p_{0,5}/p_3$ равно соответственно 0,77, 0,78 и 1,08.

В работе [18] приведена таблица перечисленных интерпретационных параметров для различных значений глубины, угла падения и соотношения размеров пласта. Этой таблицей можно пользоваться для грубой оценки геометрических характеристик пласта по графикам \mathcal{E}_z . Для более точной интерпретации можно воспользоваться способом подбора. Для построения эталонных кривых можно воспользоваться приведенной в работе [18] таблицей или получить их путем физического моделирования.

Следует заметить, что форма аномалии для тонкого пласта мало зависит от его положения относительно генераторной петли. Это объясняется тем, что в тонком пласте плоскость вихревых токов практически совпадает с плоскостью пласта. В мощном пласте кроме вихревых токов, протекающих в плоскости пласта, возникают системы вихревых токов, плоскости которых имеют иную ориентировку. Эти токи затухают быстрее токов, параллельных боковым граням пласта. Поэтому при малых t аномалия по форме может несколько отличаться от аномалии на более поздних временах.

Рассмотрим пример результатов МПП с автономной приемной рамкой на колчеданном месторождении. Рудное тело представляет собой пластообразную залежь длиной порядка 550 м с углом падения около 70° . У поверхности земли залегает слой рыхлых отложений мощностью 30-50 м. Определенная по переходной характеристике на пикете 52 его продольная проводимость равна 7 См.

На плане изолиний \mathcal{E}_z/I в поле генераторной петли 1, расположенной таким образом, что большая часть рудного тела находится в центральной зоне, рудная залежь отмечается нуле-

вой изолинией. По сторонам от нулевой изолинии располагаются области положительных и отрицательных значений \mathcal{E}_z/I . Большую интенсивность имеет отрицательный экстремум, расположенный со стороны падения залежи. Длина наиболее интенсивной части аномалии примерно равна длине рудного тела (рис. 7.21, а).

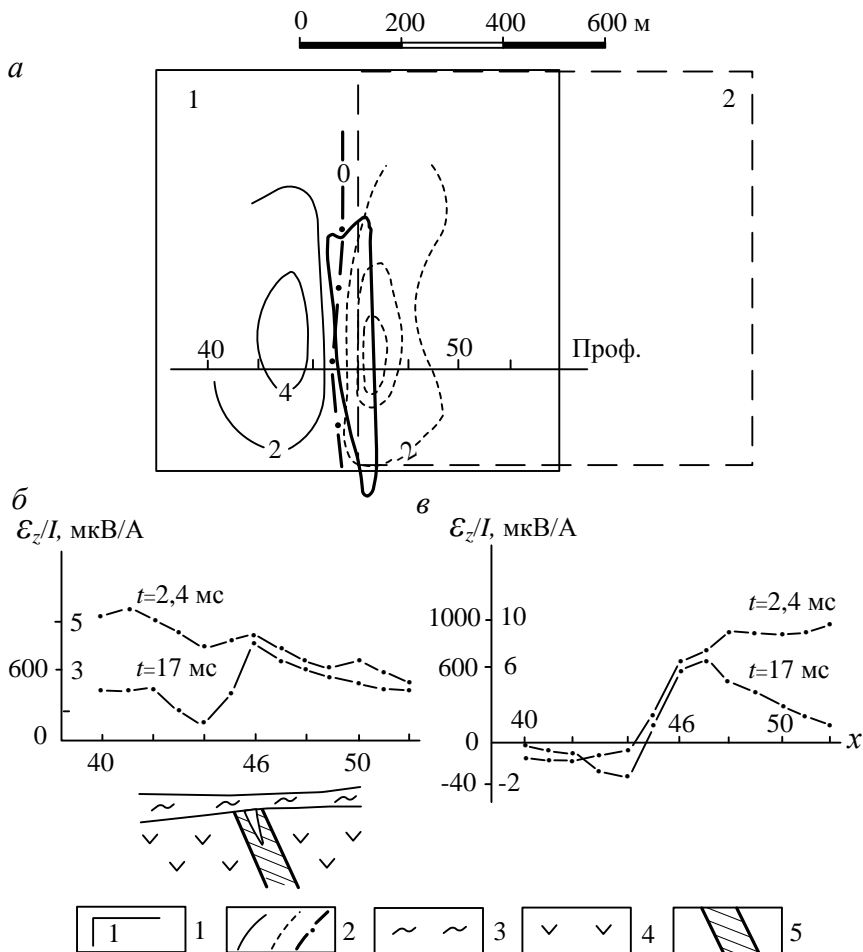


Рис. 7.21. Результаты МПП с автономной приемной рамкой на колчеданном месторождении (по материалам работы [18]):

a – план изолиний \mathcal{E}_z/I ; *б* - графики \mathcal{E}_z/I в центральной зоне и геологический разрез; *в* – графики \mathcal{E}_z/I в зоне провода.

1 – контуры и номера генераторных петель; 2 – изолинии \mathcal{E}_z/I , положительные, отрицательные, нулевая; 3 – рыхлые отложения; 4 – эффузивно-осадочные породы; 5 – рудное тело

На графике \mathcal{E}_z/I при $t=2,4$ мс на фоне сильного влияния верхнего слоя аномалия от рудного тела не проявляется. В восточной половине петли при приближении к проводу наблюдается отчетливое уменьшение аномалии от среды, как на теоретической кривой при $\tau_S=1$ (см. рис. 7.17). В западной половине петли из-за увеличения здесь мощности наносов \mathcal{E}_z/I сначала растет и только на последней точке, в 100 м от провода, намечается ее уменьшение (см. рис. 7.21, *б*). При $t=17$ мс на фоне все еще значительного влияния среды наблюдается знакопеременная аномалия от локального объекта, аналогичная аномалии на рис. 7.20.

При расположении объекта в зоне провода генераторной петли 2 при $t=17$ мс влияние среды практически отсутствует, а рудное тело отмечается четкой знакопеременной аномалией (см. рис. 7.21, *в*). Отношение амплитуд экстремумов составляет 0,5, что соответствует углу падения 70° (см. рис. 7.20). На графике \mathcal{E}_z/I в центральной зоне это отношение несколько меньше, что возможно связано с меньшей точностью его определения на фоне аномалии от вмещающей среды.

Скважинные исследования МПП могут выполняться в двух вариантах. В одном варианте измерения выполняются по системе профилей на поверхности земли, как в вышеописанной модификации. Электромагнитное поле создается с помощью заземленного провода, расположенного в скважине. Один его конец заземляется в скважине, другой – на поверхности земли возле устья скважины, т. е. используется такая же установка, как в методе заряда с измерением магнитного поля. В другом варианте поле создается с помощью генераторной петли, расположенной на поверхности земли около скважины, а измерения выполняются по стволу скважины.

При расположении провода в скважине электромагнитное поле создается током, протекающим по проводу и токами, стекающими с заземлений. Так как скважины обычно бурятся под достаточно большим углом к поверхности земли, магнитное поле тока в проводе ориентировано под небольшим углом к горизонтали. Поэтому вид аномалий от локальных объектов качественно аналогичен виду аномалий в зоне провода в поле незаземленной петли.

На рис 7.22 приведен пример результатов измерений в поле провода, расположенного в скважине. Длина провода 200 м, наклон скважины 80° . На рисунке показана проекция скважины на плоскость профиля. Сама скважина располагается в 350 м от профиля вблизи конца рудного тела. Над верхушкой рудного тела наблюдается переход графика \mathcal{E}_z/I через нуль, слева и справа от него – экстремумы разного знака. Качественно аномалия не отличается от аномалий в зоне провода незаземленной петли, показанной на рис. 7.21, в.

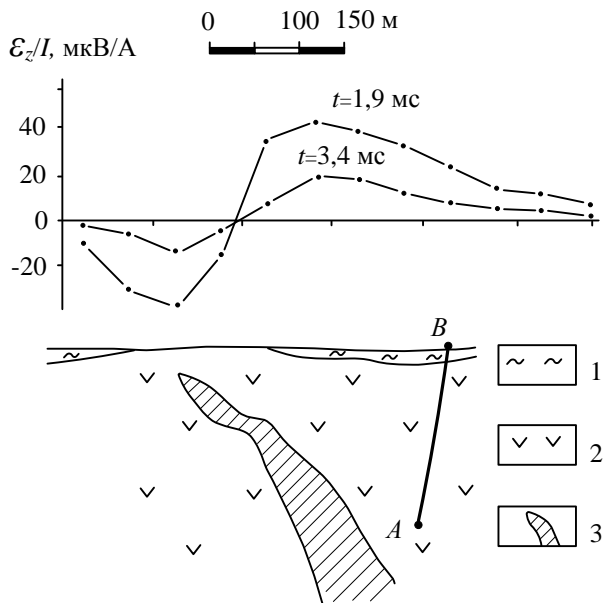


Рис. 7.22. Результаты скважинного варианта МПП на колчеданном месторождении [18]:
1 – рыхлые отложения; 2 – вулканические породы; 3 – рудное тело

В другой модификации скважинного варианта МПП электромагнитное поле возбуждается с помощью генераторной петли, разложенной на поверхности земли, как в наземном варианте метода. Измерения выполняются по скважине, которая может располагаться как внутри петли, так и на небольшом расстоянии вне её. В скважинном снаряде монтируются три взаимно ортогональные рамки, что позволяет выполнять трехкомпонентные измерения поля. Снаряд опускается в скважину на бронированном кабеле. Измерения производятся поточечно. Для измерений можно использовать любую аппаратуру МПП. Изменяются осевая компонента \mathcal{E}_{oc} , ориентированная по оси скважины и две поперечные компоненты. Поперечная компонента, лежащая в проходящей через скважину вертикальной плоскости, называется вертикальной

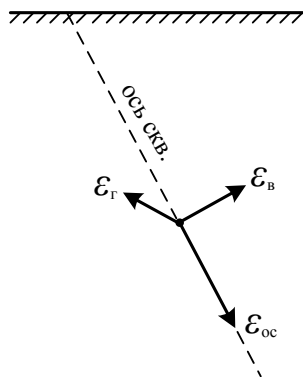


Рис. 7.23. Ориентировка пространственных компонент поля в скважине (показаны положительные направления)

вертикальной $\mathcal{E}_в$. Компонента, ориентированная горизонтально, перпендикулярно плоскости скважины, называется горизонтальной $\mathcal{E}_г$. Ориентировка компонент показана на рис. 7.23. По осевой компоненте определяется глубина расположения ближайшей кромки объекта. Поперечные компоненты используются для определения направления на объект.

Вид аномалии для заданных формы и местоположения объекта можно представить, зная ориентировку первичного поля

в области объекта (см. рис. 7.16). Для пластообразного проводящего объекта характер аномалии показан на рис. 7.24.

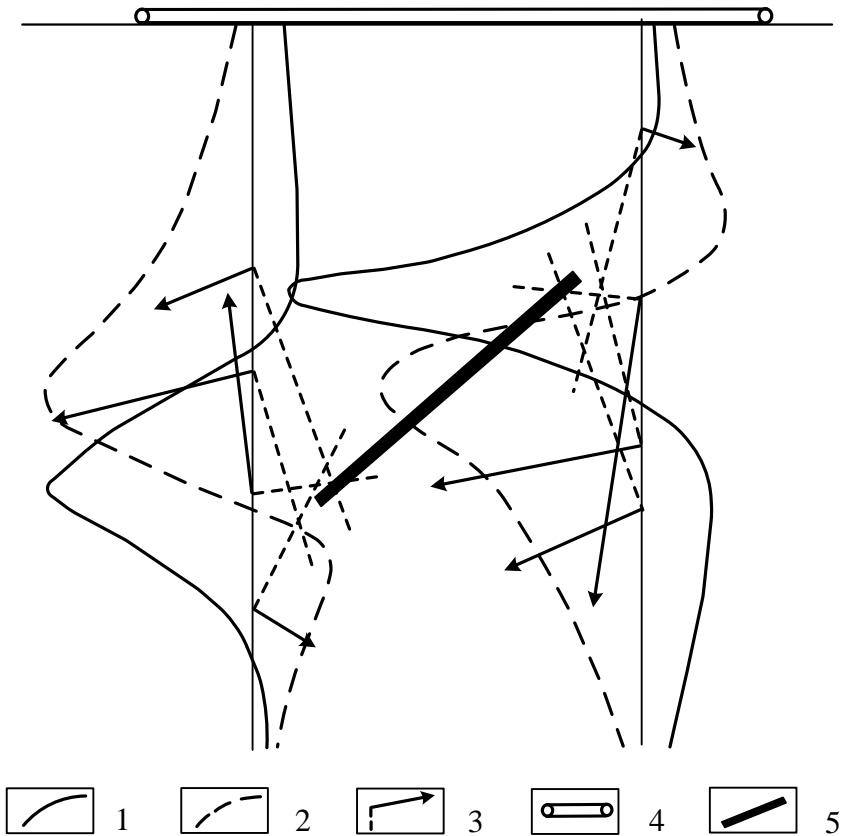


Рис. 7.24. Аномалия МППС (физическое моделирование) от проводящей пластины (по Ю. И. Булгакову и др.):

- 1 – графики E_z/I ; 2 – графики E_y/I ; 3 – векторы E/I в плоскости разреза и нормали к ним;
- 4 – положение генераторной петли; 5 – положение пластины

Так как основной вклад в аномалию вносит вихревой ток, протекающий по ближней кромке объекта, ориентировка векторов напряженности вторичного поля близка к направлению касательных к окружностям с центрами в области этой кромки. На

этом основано определение положения ближней кромки объекта. Если к построенным на разрезе векторам напряженности вторичного поля провести перпендикуляры, они пересекутся в области кромки объекта (см. рис. 7.24).

Для построения векторов напряженности поля в плоскости скважины используются осевая и вертикальная компоненты. Горизонтальная компонента используется для определения направления на объект перпендикулярно плоскости разреза.

Построение векторов \mathcal{E}/I можно использовать для разделения аномалий от локальных объектов и вмещающей среды. Для локального объекта положение вихревых токов не меняется во времени, поэтому области пересечения нормалей к векторам для разных значений времени t совпадают. Для аномалий от проводящей вмещающей среды область пересечения нормалей к векторам при изменении t перемещается вслед за областью максимальной плотности вихревых токов (см. рис. 7.1).

7.10. Аэровариант метода переходных процессов (АМПП)

Так как в методе переходных процессов нет необходимости в заземлениях, он может быть осуществлен в аэроварианте. В этом случае используется дипольная установка, и метод представляет собой дипольное индуктивное профилирование с измерением неустановившегося поля. В АМПП генераторный контур монтируется на корпусе летательного аппарата – самолета или вертолета, а измерительный контур – в подвесной гондоле. В нашей стране создана аппаратура АМПП, смонтированная на вертолете. Вертолету отдано предпочтение из-за того, что он может летать на меньшей высоте и с меньшей скоростью, что позволяет проводить более детальную съемку. В Канаде фирмой Баринджер выпускается аналогичная аппаратура INPUT, монтирующаяся на самолете.

Рассмотрим кратко аппаратуру АМПП-2. Внешний вид оборудованного для работы методом переходных процессов вертолета показан на рис. 7.25. Генераторный контур (1) имеет

вид кольца диаметром 7 м, укрепленного на корпусе вертолета в горизонтальном положении. Контур имеет 10 витков. Каждый виток помещен в алюминиевую трубку. Пространство между витками заполнено изолирующим материалом. Все витки вместе также обмотаны изоляционной лентой с клеем.

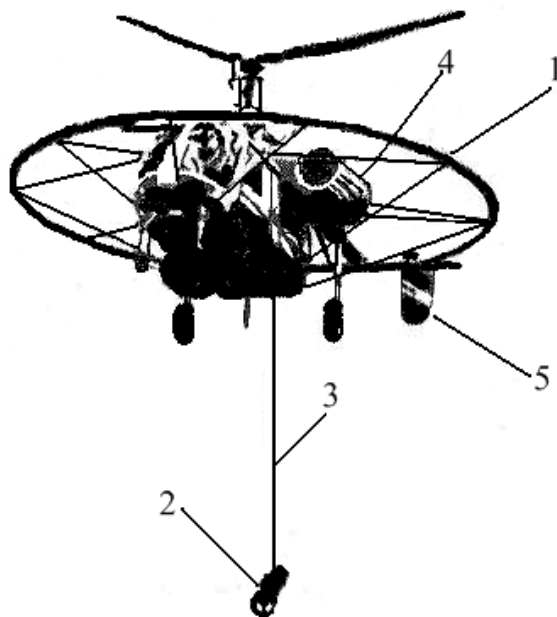


Рис. 7.25. Общий вид вертолета, оборудованного для АМПП [14]

Гондола (2) подвешивается на трос-кабеле (3), состоящего из восьми токопроводящих жил и стального троса, обеспечивающего необходимую прочность. Стандартная длина трос-кабеля 35 м, при необходимости она может быть увеличена в 2-3 раза. По левому борту установлен приемник гондолы (4). Кроме генераторного контура на вертолете смонтирован вертикальный компенсационный контур(5), необходимый для компенсации помех, создаваемых вихревыми токами в корпусе вертолета. Плоскость этого контура перпендикулярна продольной оси вертолета.

Приемное устройство помещается в контейнере гондолы. Оно состоит из измерительного контура и широкополосного усилителя. Приемный контур помещен в массивный корпус, укрепленный на амортизационной подвеске для стабилизации его положения во время полета.

В кабине вертолета размещены генераторное и измерительное устройства. Генераторное устройство состоит из двух генераторов и синхронизирующей схемы. С генераторов в генераторный контур подаются импульсы чередующейся полярности длительностью 4 мс с паузой 4 мс. Применение схемы удвоения позволяет повысить помехозащищенность.

Измерительное устройство имеет четыре одинаковые канала. Три из них используются для измерения неустановившегося сигнала на трех заданных временах в диапазоне 0,5-3 мс. Четвертый канал используется для регистрации дополнительной информации: записи сигнала во время пропускания тока, записи изменения поля вихревых токов в корпусе вертолета и т. п. Для контроля за поведением поля вихревых токов в корпусе вертолета на канал подается сигнал с компенсирующего контура. Этот же сигнал используется в рабочих каналах для компенсации помех от корпуса вертолета.

Сигналы поступают на входные устройства, в которых формируются строб-импульсы для заданных значений времени t . Здесь же формируются компенсирующие строб-импульсы от тока в генераторном и вертикальном компенсирующем контурах. Далее после усиления импульсы поступают в дифференциальные накопители, в которых формируются разности значений сигналов противоположной полярности и производится их накопление. Затем через усилители постоянного тока результаты передаются на аналоговый или цифровой регистратор.

В аэроварианте МПП при измерениях возникают специфические помехи, вызванные вихревыми токами в корпусе вертолета. На расстоянии, на котором располагается приемное устройство (более 20 м), можно полагать эти токи эквивалентными двум магнитным диполям. Момент одного из диполей

ориентирован горизонтально по направлению полета, другой – вертикально.

Вертикальный компенсирующий контур расположен нормально к продольной оси вертолета, т. е. перпендикулярно полю эквивалентного диполя с горизонтально ориентированным моментом. В конце паузы в компенсирующий контур посылаются дополнительный токовый импульс и сигнал от него в приемном контуре через делитель напряжения подается в измерительные каналы, стробируются и используются для компенсации сигналов от токов в корпусе вертолета (от эквивалентного диполя с горизонтальным моментом).

Для компенсации помехи от горизонтальных вихревых токов в корпусе (эквивалентный диполь с вертикально ориентированным моментом) используются сигналы, снятые с приемного контура во время токового импульса. Коэффициенты деления напряжения в компенсационных каналах подбираются опытным путем во время пробного залета перед началом работы.

Для геодезической привязки результатов измерений, как при любых аэросъемках, могут быть использованы аэрофото-съемка или радиогеодезические методы.

Ток в горизонтальном генераторном контуре возбуждает в земле под вертолетом первичное поле с близкой к вертикальной ориентировкой. Так как приемный контур тоже горизонтальный, с его помощью регистрируется вертикальная компонента вторичного поля. Поэтому вид аномалий в АМПП такой же, как в наземном варианте в центральной части петли, т. е. проводящие объекты выделяются положительными аномалиями.

Пример результатов АМПП над Тарньерским колчеданым месторождением на Северном Урале приведен на рис. 7.26. На рисунке результаты измерений выражены не в мкВ/А, а, как это часто делается в АМПП, в долях сигнала \mathcal{E}_{z0}/I во время импульса, т. е. в единицах $\mathcal{E}_z/\mathcal{E}_{z0}$. Рудное тело при $t=1$ мс отмечается отчетливой аномалией. При $t=2$ мс интенсивность аномалии уменьшается более чем в три раза, а при $t=3$ мс аномалия прак-

тически затухает. Наблюдается небольшое смещение аномалии в направлении полета относительно рудного тела, залегающего на меньшей глубине, вносящего основной вклад в аномальный эффект. Смещение аномалии возникает из-за того, что во время токового импульса и в момент измерения вертолет находится в разных точках (результат относится к точке положения вертолета в момент измерения). При необходимости для уточнения положения объекта можно повторить измерения при тех же параметрах полета, но в обратном направлении. Тогда точка пересечения прямого и обратного графиков укажет положение объекта.

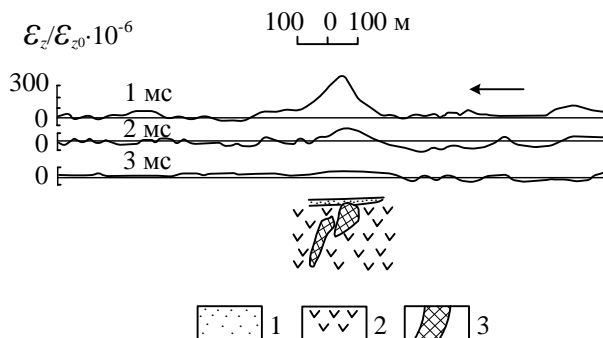


Рис. 7.26. Результаты АМПП над Гарньерским месторождением на высоте 80 м [14]:

1 – рыхлые отложения; 2 – вулканические породы; 3 - колчеданные руды

При интерпретации аномалий можно приближенно оценить глубину залегания объекта и некоторые его параметры. Так как в АМПП расстояние между приемным контуром и объектом достаточно велико, можно с большей степенью приближения, чем в наземном варианте, аппроксимировать объект шаром. Глубина до центра эквивалентного шара оценивается по формуле:

$$h = q_{0,5} + |\Delta z| - h_{\text{пол}} \quad (7.28)$$

где $q_{0,5}$ – ширина аномалии на уровне полумаксимума; $h_{\text{пол}}$ – высота полета; Δz – разность высот генераторного и приемного

контуров, близкая к длине трос-кабеля. В приведенном на рис. 7.26 примере $q_{0,5} \approx 130$ м, $h_{\text{пол}} = 80$ м, $|\Delta z| \approx 35$ м. По этим данным определяется глубина 85 м, что близко к реальной глубине до центра верхнего рудного тела.

По переходной характеристике так же, как при наземных исследованиях, можно оценить параметр объекта, а затем, задавшись размером эквивалентного шара сообразуясь с шириной аномалии, оценить порядок удельного сопротивления объекта.

Кроме поисков хорошо проводящих рудных объектов АМПШ может применяться и для решения других геологических задач. В частности, его можно использовать для выявления перспективных на углеводороды участков по геоэлектрическим ореолам залежей нефти и газа. Это может в несколько раз сократить объемы более дорогостоящих наземных работ. Примеры результатов АМПШ в нефтеносных провинциях были рассмотрены в разделе 1.8 (см. рис. 1.17, 1.18).

7.11. Методика работ методом переходных процессов

Выбор размеров петли. Соотношение между полезным сигналом и помехами, которое определяет контрастность аномалий, а, следовательно, и глубину исследования, зависит от правильности выбора размеров генераторной петли. Поэтому, при определении методики работ наземными методами, выбор размера петли имеет первостепенное значение.

Помехи могут быть электромагнитными и геоэлектрическими. Электромагнитные помехи – это посторонние поля естественного или техногенного происхождения. Геоэлектрические помехи – это влияние проводящей вмещающей среды. Обычно считают, что аномалия выделяется надежно, если амплитуда полезного сигнала превышает уровень помех не менее чем в три раза.

Для оценки этого соотношения на этапе проектирования необходимо задать минимальный, представляющий практический интерес, размер объекта и его удельное сопротивление. В качестве модели объекта проще всего принять шар. Более про-

стые аналитические выражения получаются, если петля имеет форму окружности. Полученные при этом выводы с хорошим приближением пригодны для квадратной петли, половина длины стороны которой L равна радиусу круглой петли.

Амплитуда сигнала электромагнитной помехи определяется выражением:

$$U_{\text{пом}} = nq, \quad (7.29)$$

где n – величина помехи в петле с площадью 1 м^2 , q – эффективная площадь измерительного контура.

Рассмотрим применительно к однопетлевой установке случай, когда объект находится в непроводящей среде, т. е. геоэлектрические помехи отсутствуют. Полезный сигнал от шара в этом случае определяется уравнением:

$$\mathcal{E} = \frac{\mu_0 \pi I}{2t} \cdot \frac{L^4 a^3}{(L^2 + h^2)^3} \cdot 0,24 \Psi(\alpha t). \quad (7.30)$$

В этой формуле h – глубина до центра шара, функция

$$\Psi(\alpha t) = 25\alpha t \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\pi n)^2 \alpha t} \quad (7.31)$$

определяет зависимость аномалии от времени и параметров шара $\left(\alpha = \frac{1}{\mu \gamma a^2} \right)$. Коэффициент 25 введен для того, чтобы экстремум функции был равен единице.

Введем относительный размер петли $\bar{L} = L/h$ и, воспользовавшись уравнениями (7.29) и (7.30) запишем выражение для отношения полезного сигнала к помехе:

$$\frac{\mathcal{E}}{U_{\text{пом}}} = 0,12 \frac{\mu_0 I}{nt} \cdot \frac{a^3}{h^4} \cdot \frac{\bar{L}^2}{(1 + \bar{L}^2)^3} \Psi(\alpha t). \quad (7.32)$$

Приняв это выражение равным 3, и решив полученное уравнение относительно h , получим предельную глубину обнаружения объекта:

$$h_{\text{макс}} = 0,62 \left[\frac{0,12 I \mu_0 a^3}{3nt} \Psi(\alpha t) \right]^{1/4} \cdot f(\bar{L}), \quad (7.33)$$

где

$$f(\bar{L}) = 1,61 \left[\frac{\bar{L}^2}{(1 + \bar{L}^2)^3} \right]^{1/4} \quad (7.34)$$

функция, определяющая зависимость отношения полезного сигнала и помехи от размера петли.

Функция $\Psi(\alpha t)$ имеет максимум при $\alpha t = 0,08$. Следовательно максимальную амплитуду сигнал имеет при $t = 0,08/\alpha = 0,08\mu\gamma a^2$. Подставив это время в формулу (7.33), и положив $\psi(\alpha t) = 1$, получим для максимальной глубины более удобное выражение:

$$h_{\text{макс}} = 0,52 \left(\frac{Ia}{\gamma n} \right)^{1/4} \cdot f(\bar{L}). \quad (7.35)$$

Так как в процессе работы петля перемещается с конечным шагом, объект может оказаться смещенным относительно ее центра, и амплитуда аномалии будет меньше. Поэтому получающееся по формуле (7.35) значение $h_{\text{макс}}$ уменьшают на 10 % и при вычислениях вместо коэффициента 0,52 принимают 0,47.

Как следует из формулы (7.35), предельная глубина исследования может быть увеличена техническими средствами путем увеличения силы тока в генераторном контуре.

Функция $f(\bar{L})$ имеет максимум равный 1 при значении $\bar{L} = 0,71$, которое является оптимальным. При удалении от оптимального значения \bar{L} функция $f(\bar{L})$ убывает: медленно при увеличении \bar{L} и быстро при его уменьшении (рис. 7.27). Таким образом, при отсутствии заметного влияния вмещающей среды оптимальным является размер петли со стороны, примерно в полтора раза превышающей глубину до центра объекта.

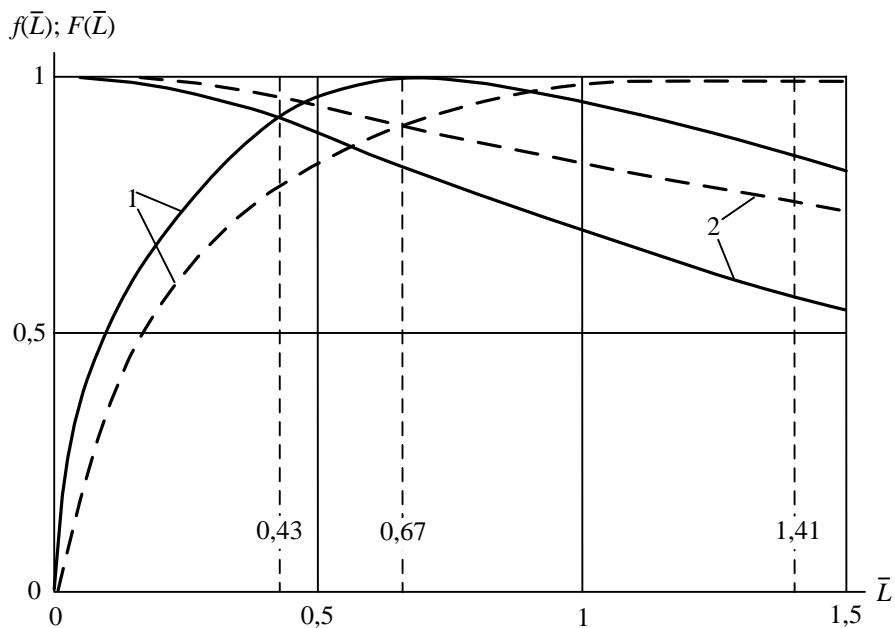


Рис. 7.27. Графики функций $f(\bar{L})$ и $F(\bar{L})$ для однопетлевой (сплошные линии) и с автономной приемной рамкой (штриховые линии) установок (по Ф. М. Каменецкому):

1 – графики $f(\bar{L})$; 2 – графики $F(\bar{L})$

Такой характер поведения функции $f(\bar{L})$ объясняется следующим образом. При малых размерах петли первичное поле быстро затухает с глубиной и в области расположения объекта имеет малую интенсивность. Поэтому мала и интенсивность вторичного поля. По мере увеличения размера петли поле проникает на все большую глубину. Это приводит к росту амплитуды аномалии от объекта. В то же время при увеличении L увеличивается площадь петли и согласно формуле (7.29), растет влияние помехи. Поэтому после достижения максимума отношение полезного сигнала и помехи начинает уменьшаться.

В случае наличия геоэлектрических помех от проводящей вмещающей среды глубина обнаружения локального объекта

зависит от соотношения сигналов от объекта и среды. Это отношение пропорционально функции

$$F(\bar{L}) = \left(1 + \bar{L}^2\right)^{-1/2}, \quad (7.36)$$

монотонно убывающей с увеличением \bar{L} (см. рис. 7.27). Следовательно, влияние среды растет с увеличением размера петли.

Таким образом, для достижения необходимой глубины исследования петля должна иметь достаточно большой размер. Но чрезмерное увеличение размера петли приводит к усилению влияния среды и ухудшению соотношения "полезный сигнал-помеха". Компромиссным, обеспечивающим оптимальные условия выявления аномалии от объекта, является размер петли, при котором $F(\bar{L}) = f(\bar{L})$. Для однопетлевого варианта он соответствует $\bar{L} = 0,43$ (см. рис. 7.27). Следовательно, оптимальной является петля, сторона которой равна $0,86h_{\text{макс}}$, т. е. примерно равна предельной глубине обнаружения объекта. При этом размере петли $F(\bar{L}) = f(\bar{L}) = 0,92$.

В случае проводящей вмещающей среды формулы для оценки предельной глубины находятся таким же способом, как и в случае влияния электромагнитных помех. Записывается отношение полезного сигнала и сигнала от вмещающей среды, и приравнивается к трем. Искомые формулы получаются в результате решения полученного уравнения относительно h .

Для случая влияния проводящих вмещающих пород

$$h_{\text{макс}} = 0,52a \left(\frac{\rho_{\text{вм}}}{\rho_{\text{об}}} \right)^{1/4} F(\bar{L}). \quad (7.37)$$

В случае проводящего слоя рыхлых отложений максимальная глубина исследования

$$h_{\text{макс}} = 0,20a \left(\frac{S_{\text{об}}}{S_1} \right)^{1/2} F(\bar{L}). \quad (7.38)$$

В приведенных формулах $\rho_{об}$ – удельное сопротивление объекта; $\rho_{вм}$ – удельное сопротивление вмещающей среды; S_1 – продольная проводимость слоя рыхлых отложений; $S_{об}=a/\rho_{об}$ – условная "продольная проводимость" объекта.

Для оценки возможной глубины обнаружения объекта при заданных условиях надо оценить ее для всех трех случаев и принять меньшее из полученных значений. По этой глубине выбирается размер петли.

В варианте с автономной приемной выражения для функций $f(\bar{L})$ и $F(\bar{L})$ несколько отличаются от выражений для однопетлевого варианта и имеют вид:

$$f(\bar{L})_{авт} = 1,27 \left[\frac{\bar{L}^2}{(1 + \bar{L}^2)^{3/2}} \right]^{1/4}, \quad (7.39)$$

$$F(\bar{L})_{авт} = (1 + \bar{L}^2)^{-1/4}. \quad (7.40)$$

Графики этих функций показаны на рис. 7.27 штриховыми линиями. Функция $f(\bar{L})_{авт}$ достигает максимального значения при $\bar{L} = 1,41$. Следовательно, при отсутствии заметного влияния вмещающей среды оптимальной является петля с длиной стороны, равной примерно утроенной глубине до центра объекта. Экстремум функции $f(\bar{L})_{авт}$ очень пологий, что позволяет варьировать размером петли. Предельная глубина обнаружения объекта определяется по формуле

$$h_{макс.авт} = 0,60 \left(\frac{Ia}{\gamma n} \right)^{1/4} f(\bar{L})_{авт}, \quad (7.41)$$

При заметном влиянии вмещающей среды оптимальным является размер петли, при котором $f(\bar{L})_{авт} = F(\bar{L})_{авт}$. Это соответствует $\bar{L} = 0,67$ (см. рис. 7.27). Таким образом, при работе с автономной приемной рамкой в условиях влияния вмещающей

среды оптимальной является петля со стороны, примерно в полтора раза (в 1,34 раза) превышающей предельную глубину обнаружения объекта. Эта глубина оценивается по тем же формулам, что для однопетлевого варианта.

Так же оценивается оптимальный размер петли при наблюдениях в скважинном варианте метода, когда измерения выполняются в скважине.

Сеть наблюдений и выбор положения петли. При оценке глубины исследования, учитывая, что объект может быть смещен относительно центра петли, принимается уровень сигнала, равный двум третям от максимального. При работе с однопетлевой установкой этот уровень сигнала обеспечивается, если шаг перемещения петли не превышает длины ее стороны $2L$. Поэтому при поисковых работах принимают такой шаг и укладывают петли вплотную одна к другой без перекрытий и без пропусков. В то же время такая методика наиболее технологична, так как для следующей петли используется одна из сторон предыдущей петли. Заметим, что для такой методики обычное понятие масштаба съемки неприменимо.

Для уточнения положения объекта иногда в пределах площади аномальных петель выполняют наблюдения с размерами петель в два раза меньшими размера основной петли (если с такими петлями аномалия не затухает). Такая методика трудоемка и применяется редко. Более производительный, но менее точный способ уточнения положения вызвавшего аномалию объекта – выполнение на аномальных участках наблюдений с половинным шагом при том же размере петли. Более точно определить положение объекта и получить результаты, пригодные для количественных оценок, позволяют исследования с автономной приемной рамкой. В зависимости от размеров аномалии в плане, работы проводят в масштабах 1:5000 (50x20 м) или 1:10000 (100x50 м). В процессе работы уменьшают шаг в окрестностях характерных точек графиков – экстремумов и переходов через нуль. Иногда применяют более крупный масштаб. Профили наблюдений, как обычно, ориентируют вкрест простирания пород.

Положение петли при детализационных работах выбирают исходя из предполагаемой по геологическим данным формы объекта. В случае изометричных или пологозалегающих объектов петлю располагают так, чтобы аномалия находилась в ее центральной части. Если ожидаемая форма объекта линзообразная или пластообразная, с крутым падением, одну из сторон петли располагают в области аномалии, так чтобы петля располагалась со стороны падения (над объектом).

Так же располагается петля в случае измерений в скважине. Шаг наблюдений по скважине обычно применяют равным 10-20 м.

При измерениях в поле провода, расположенного в скважине, измерения производятся так же, как в наземном варианте с автономной приемной рамкой.

В аэроварианте МПП профили ориентируются вкрест господствующего простирания пород. При этом концы маршрутов должны быть привязаны к надежным естественным или искусственным ориентирам. Длина профилей обычно составляет 10-20 км.

Расстояние между профилями выбирается таким, чтобы при расположении объекта в стороне от профиля предельная глубина его обнаружения уменьшалась не более, чем на 20 % по сравнению с измерениями над центром объекта. Обычно работы проводят в масштабах 1:25000 или 1:10000 (расстояние между профилями 250 или 100 м). Иногда масштаб укрупняют до 1:5000 (50 м между профилями).

Время измерения следует считать оптимальным, если аномалии от локальных объектов имеют максимальную интенсивность. Так как интенсивность аномалий пропорциональна функции $\psi(\alpha t)$, время t в этом случае должно быть таким, чтобы эта функция имела наибольшую величину. Функция $\psi(\alpha t)$ имеет максимальную величину при $\alpha t = 0,08$. Отсюда можно найти оптимальное время:

$$t_{\text{опт}} = \frac{0,08}{\alpha} \text{с} = \frac{80}{\alpha} \text{мс}. \quad (7.42)$$

Практически измерения выполняются во всем диапазоне времен, в котором возможны измерения: от минимального значения t до времени, до которого возможны измерения. Этот диапазон должен включать $t_{\text{опт}}$. Следует иметь в виду, что при достаточно сильном влиянии вмещающей среды $t_{\text{опт}}$ может быть в 2-3 раза больше определяемого по формуле (7.42).

Оценка качества работ производится, как и в других методах электроразведки, по результатам контрольных измерений. Объем контрольных измерений должен составлять не менее 5 % от общего объема. Точность измерений оценивается по среднему относительному расхождению между контрольными и первичными измерениями так же, как в методах сопротивления. Средняя величина расхождения не должна превышать 20 %.

В АМПШ основным критерием оценки качества съемки является уровень помех, характеризующийся стандартным отклонением сигнала помехи от нуля [11, 14]. Его оценивают для достаточно представительной выборки по формуле:

$$\sigma = \left[\sum p(\varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i^2 \right]^{1/2}, \quad (7.43)$$

где $p(\varepsilon_i)$ – вероятность помехи с уровнем ε_i .

Для оценки σ в нормальном поле производится съемка по профилю длиной $X=10-15$ км, проходящему над местностью с ровным рельефом и однородным высокоомным геологическим разрезом. Полеты по этому профилю производятся всегда на одной высоте 200-300 м со скоростью 80 км/час при хороших метеоусловиях. По результатам съемки определяют интервалы $\Delta x_n(\varepsilon_i)$, на которых сигнал помехи находится в пределах $\varepsilon_i \pm \Delta \varepsilon_i$, и вычисляют значения вероятностей

$$p(\varepsilon_i) = \frac{\sum_n^{\Delta x_n(\varepsilon_i)}}{X}, \quad (7.44)$$

которые подставляют в формулу (7.43). Величина σ не должна превышать $(20-30) \cdot 10^{-6}$ от уровня поля во время импульса. Так

как максимальная величина сигнала помехи с вероятностью 99 % не может превышать величины 3σ , этот уровень и полагают фоновым.

Кроме определения уровня помех, на аномальных участках выполняют повторные измерения при тех же условиях, что и первичные. Так как полностью воспроизвести условия, при которых выполнялись первичные измерения, практически невозможно, требуется лишь качественное воспроизведение первичных измерений.

7.12. Взаимное влияние индукционных неустановившихся процессов и вызванной поляризации

В методах становления электромагнитного поля и в методе вызванной поляризации в среде возбуждаются два типа полей: поле, имеющее своей причиной индукционные процессы, и поле вызванной поляризации. Эти поля имеют противоположное направление и характеризуются различными постоянными времени. Одновременное возбуждение двух типов полей объясняется тем, что в методах становления поля при протекании через среду вихревых токов среда поляризуется так же, как при пропускании тока через заземленную питающую линию. В методе вызванной поляризации при выключении импульса тока (или при изменении тока во времени в методе ВП на переменном токе) в среде возникает индуцированное поле вихревых токов.

Механизм образования поля ВП в локальном объекте в **методе переходных процессов** показан на рис. 7.28. При малых значениях времени t индукционное поле имеет интенсивность, значительно превышающую интенсивность поля вызванной поляризации. Но так как это поле затухает быстрее поля ВП, с течением времени интенсивности полей становятся сопоставимыми. Так как направления полей противоположны, результаты измерений в МПП занижаются. При больших значениях времени t и высокой поляризуемости среды интенсивность поля ВП может превысить интенсивность индукционного поля,

что приводит к появлению отрицательных значений \mathcal{E}/I рис. (7.29).

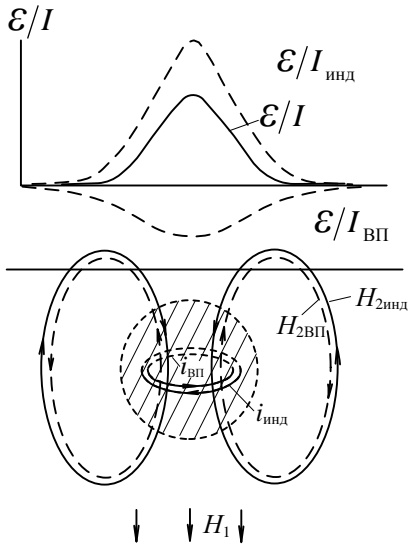


Рис. 7.28. Неустановившееся электромагнитное поле вихревых токов ($i_{инд}$ и $H_{2инд}$) и токов вызванной поляризации ($i_{ВП}$ и $H_{2ВП}$)

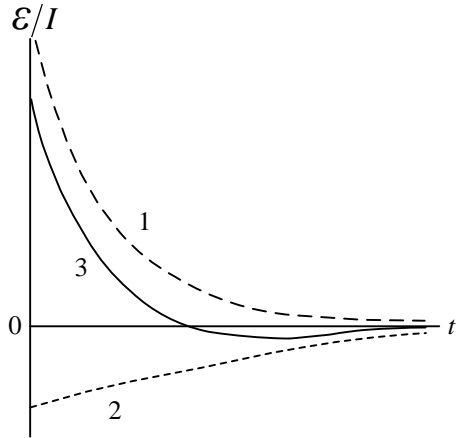


Рис. 7.29. Вид переходной характеристики при сильном влиянии вызванной поляризации:

1 – индукционная переходная характеристика; 2 – переходная характеристика вызванной поляризации; 3 – суммарная (наблюдаемая) переходная характеристика

Сильное влияние вызванной поляризации в МПП вероятнее всего при относительно высоком удельном сопротивлении и высокой поляризуемости объекта или всей среды. В этом случае индуцированное поле имеет относительно малую интенсивность, а интенсивность поля ВП высокая. Такие условия могут наблюдаться, например, на участках с прожилково-вкрапленным оруденением. Влияние вызванной поляризации в МПП может приводить к искажению переходной характеристики и погрешностям определения параметра α .

При зондировании становлением поля в ближней зоне на значительные глубины, когда время t достигает десятков миллисекунд и более, проявляется аналогичный механизм влия-

ния вызванной поляризации. Это может привести к искажению результатов измерений на больших временах и к искажению конечной части кривых зондирования. Соответственно могут оказаться искаженными результаты интерпретации таких кривых.

При малых временах (в микросекундном диапазоне) также наблюдаются аналогичные явления, получившие название индукционной вызванной поляризации (ВПИ). Объяснить ВПИ так же, как обычную вызванную поляризацию нельзя, потому что за такое короткое время невозможна перегруппировка ионов в жидкой фазе породы. Наличие в породе включений электропроводящих минералов для возникновения ВПИ не обязательно, да и процессы перестройки двойного слоя на таких включениях протекают медленнее.

Полагают, что ВПИ возникает в гетерогенной среде, содержащей очень тонкие высокоомные прослойки. В частности, такими прослойками могут быть пленки углеводородов. В такой среде в относительно медленно меняющемся электромагнитном поле из-за частотной дисперсии эффективные значения диэлектрической проницаемости могут достигать очень большой величины. В результате этого в среде возникают интенсивные реактивные токи, суммирующиеся с токами проводимости. Это приводит к изменению измеряемого сигнала. На переходных характеристиках появляются коленообразные перегибы, а в случае большой интенсивности ВПИ даже локальные экстремумы.

На рис 7.30 приведен пример переходной характеристики, полученной над терригенным разрезом, в котором встречаются содержащие углеводороды (битум) пески. На переходной характеристике, полученной над таким разрезом, при $t \approx 7 \cdot 10^{-5}$ с (70 мкс), наблюдается максимум \mathcal{E}/I , которому предшествует минимум (рис. 7.30, кривая 1). На соседнем профиле, где углеводороды отсутствуют, переходная характеристика имеет нормальный вид (кривая 2). При значении $t < 20 \cdot 10^{-5}$ с (20 мкс) переходные характеристики совпадают.

В настоящее время не существует строгих способов разделения индукционного неустановившегося поля и ВПИ. Существующие приближенные способы основаны на выделении участков, на которых график зависимости \mathcal{E}/I от t отличается от монотонно убывающей с увеличением времени кривой. Для более отчетливого выделения таких участков используют не саму переходную характеристику, а ее производные. Пример результатов выделения поляризующихся участков разреза по ВПИ был приведен на рис. 7.8, в. Выделение участков с повышенной интенсивностью ВПИ повышает геологическую информативность ЗСБ.

В методе вызванной поляризации, при включении и выключении постоянного тока в питающей линии, в земле индуцируются вихревые токи, так же как при пропускании переменного тока (см. [1, часть 2], раздел 8.8). Эти токи препятствуют скачкообразному изменению магнитного поля. В первый момент после выключения тока в линии AB их магнитное поле замещает магнитное поле токов в проводе. Затем, по мере затухания вихревых токов, их магнитное поле тоже плавно затухает. Направление вихревых токов вблизи провода питающей линии при этом процессе совпадает с направлением тока в проводе во

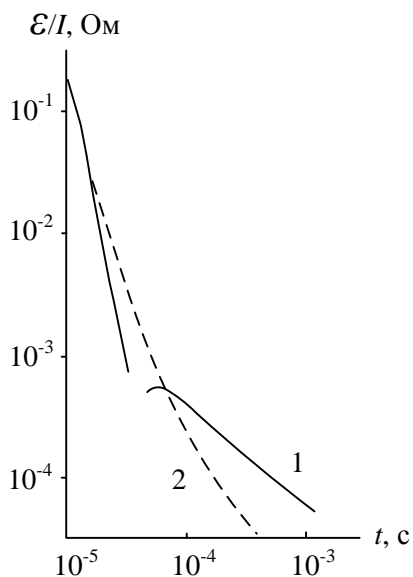


Рис. 7.30. Фрагмент переходной характеристики с интенсивным проявлением ВПИ (по материалам ВНИИГИС):

1 – переходная характеристика над разрезом с прослоем углеводородосодержащих песков; 2 – то же над разрезом, где углеводороды отсутствуют

время зарядки, т. е. противоположно направлению питающего тока в земле (рис. 7.31).

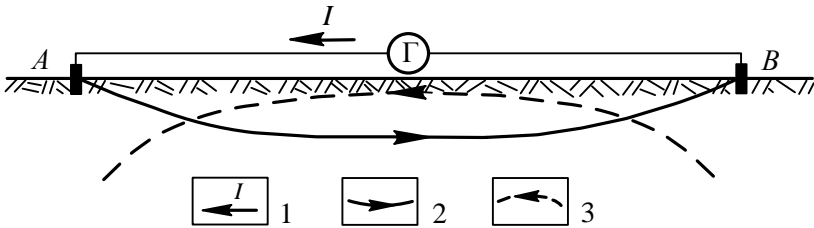


Рис. 7.31. Взаимодействие токов вызванной поляризации и индукционных токов:

1 – направление тока в линии АВ в процессе зарядки; 2 – токовые линии поля ВП; 3 – линии токов индукции

Вихревые токи создают в приемной линии разность потенциалов $\Delta U_{\text{инд}}$, противоположного знака по отношению к знаку $\Delta U_{\text{пр}}$ во время зарядки. Разность потенциалов вызванной поляризации $\Delta U_{\text{ВП}}$ имеет тот же знак, что $\Delta U_{\text{пр}}$. Таким образом, $\Delta U_{\text{ВП}}$ и $\Delta U_{\text{инд}}$ имеют противоположные знаки (см. рис. 7.31). Поэтому при измерениях по методу вызванной поляризации значения $\Delta U_{\text{ВП}}$, а, следовательно, и $\eta_{\text{к}}$ занижаются. Так как $\Delta U_{\text{инд}}$ затухает значительно быстрее $\Delta U_{\text{ВП}}$, с течением времени эта погрешность уменьшается. При малых временах задержки величина измеренной $\Delta U_{\text{ВП}}$ может быть искажена очень сильно, вплоть до появления отрицательных значений $\Delta U_{\text{ВП}}$ и $\eta_{\text{к}}$ (рис. 7.32).

При оценке $\Delta U_{\text{инд}}$ на (см. рис. 7.32) были приняты размер питающей линии $AB=3000$ м и удельное сопротивление среды $\rho=100$ Ом·м. Расчет выполнен с помощью номограммы В. Н. Дахнова (см [1, часть 2], рис. 8.12). Закон изменения $\Delta U_{\text{ВП}}$ заимствован из результатов измерений спада ВП на рудном участке, приведенных в книге В. А. Комарова [9]. Начальное значение $\eta_{\text{к}}$ при $t=0,05$ с принято равным 7 %.

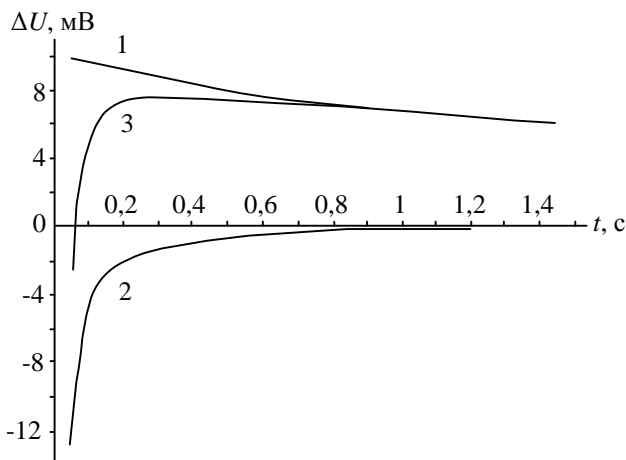


Рис. 7.32. Графики $\Delta U_{\text{ВП}}$ и ΔU , вызванной индукционным эффектом, при кондуктивном возбуждении поля:
 1 – график $\Delta U_{\text{ВП}}$; 2 – график ΔU , вызванной индукционным эффектом; 3 – график измеренной $\Delta U_{\text{ВП}}$, искаженной индукционным эффектом

Как следует из приведенного примера, искажение результатов измерений вызванной поляризации может быть весьма существенным. Его необходимо учитывать и выбирать такие условия измерений, чтобы оно не превышало допустимых пределов. Этот вопрос становится еще более актуальным в настоящее время в связи с применением аппаратуры с короткой зарядкой и малым временем спада.

Наиболее сильное влияние на результаты метода ВП индукционные эффекты оказывают при работе с большими питающими линиями в условиях низкоомного разреза. Единственным способом уменьшения влияния индукционных эффектов на результаты метода вызванной поляризации является увеличение времени спада или уменьшение размера питающей линии. Оригинальная методика выделения аномалий η_k на фоне интенсивных индукционных помех предложена В. С. Моисеевым [19]. При этой методике спад ВП регистрируется в течение длительного интервала времени, а затем строится временной

разрез, аналогично тому, как это делается в ЗМПШ. Предварительно для построения разреза выделяется аномальная составляющая η_k , как разность между измеренным η_k на пикете и средним его значением для этого времени $t_{\text{сп}}$ по профилю. Методика с положительным результатом апробировалась на нефтеперспективных участках в Западной Сибири (см. раздел 1.8, рис. 1.19 и 1.20).

При работе методом ВП на переменном токе для ослабления влияния индукционных эффектов следует уменьшать частоту или разнос AB . Степень проявления индукционных эффектов в этом случае определяется величиной параметра

$$p = L^2 \frac{f}{\rho}, \quad (7.45)$$

где L – полуразнос питающей линии в километрах; f – частота; ρ – удельное сопротивление среды. Чтобы получить требуемую Инструкцией точность измерения η_k не хуже 10 %, необходимо соблюдать условие $p \leq 0,001$. При использовании несимметричных установок за L следует принимать расстояние до ближайшего питающего заземления.

8. РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

8.1. Принцип радиолокационного зондирования

Радиолокационное зондирование (часто по используемой аппаратуре его называют георадаром) относится к группе радиоволновых методов электроразведки. Оно основано на изучении отражения высокочастотного (радиоволнового) поля от границ раздела сред с разными электромагнитными свойствами. Источником поля служит антенна в виде незаземленного электрического диполя из куска изолированного кабеля. Такая же антенна используется для приема отраженного сигнала. Измеряется время t между моментами испускания зондирующего импульса передающей антенной и прихода отраженного импульса на приемную антенну.

Пусть среда имеет одну границу раздела, расположенную на глубине h_1 . Передающая и приемная антенны расположены на расстоянии d одна от другой. На приемную антенну приходят две волны: прямая, распространяющаяся вдоль поверхности земли, и отраженная от границы раздела (рис. 8.1). Расстояние d должно быть заведомо меньше глубины до границы раздела. В этом случае можно настроить время начала регистрации сигнала таким образом, чтобы прямая волна не регистрировалась.

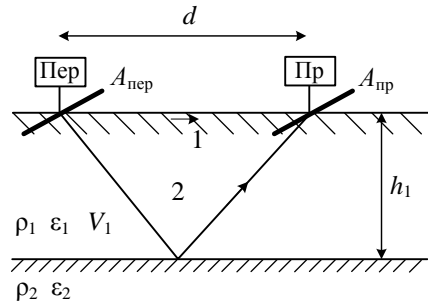


Рис. 8.1. Схема радиоволнового зондирования:

Пер – передатчик; Пр – приемник; $A_{пер}$ – антенна передатчика; $A_{пр}$ – антенна приемника; 1 – прямая волна; 2 – отраженная волна

Время t , которое отраженная волна затрачивает на распространение от передающей до приемной антенн, определяется соотношением:

$$t = \frac{2\sqrt{(d/2)^2 + h_1^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{d^2 + 4h_1^2}}{V_1}, \quad (8.1)$$

где V_1 – скорость распространения поля в верхнем слое. Если скорость V_1 известна, можно найти глубину до границы раздела:

$$h_1 = \frac{\sqrt{t^2 V_1^2 - d^2}}{2}. \quad (8.2)$$

Если скорость V_1 неизвестна, выполнив измерения в ряде точек профиля, можно получить качественную картину поведения границы раздела, так как при постоянной V_1 глубина h_1 пропорциональна времени t .

Чтобы определить скорость V_1 на какой-то точке, надо на этой точке выполнить измерения по специальной методике, которая будет описана ниже. В результате этих исследований определяются также электромагнитные параметры верхнего слоя.

Если в разрезе больше двух слоев, регистрируются отражения от всех границ раздела и определяются глубины до этих границ.

Таким образом, принцип радиолокационного зондирования аналогичен принципу сейсморазведки методом отраженных волн. Так как в радиолокационном зондировании используются более высокие частоты (десятки и сотни мегагерц), оно позволяет изучать верхнюю часть разреза с большей детальностью, чем сейсморазведка. С другой стороны применение высоких частот ограничивает глубину исследования из-за затухания поля в среде.

С целью увеличения глубины проникновения поля в землю в радиолокационном зондировании используются не радиоимпульсы в узком диапазоне частот, а широкополосные видео-импульсы, включающие спектр от очень низких частот до удвоенной центральной частоты. В этом случае глубина исследования увеличивается за счет более низких частот, для которых поле затухает медленнее.

В настоящее время глубина исследования георадаром достигает 100 м. В средах с высоким удельным сопротивлением глубина исследования может быть больше. Принципиальная возможность увеличения глубины исследования заключается также в увеличении мощности зондирующего импульса за счет повышения мощности передающего устройства.

8.2. Распространение радиоволнового поля в земле

При использующихся в радиолокационном зондировании частотах практически все горные породы, за исключением руд и графитизированных образований, можно полагать квазидиэлектриками, т. е. неидеальными диэлектриками. Для диэлектриков волновое число $\kappa = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$. Но так как реальные горные породы не являются идеальными диэлектриками, их диэлектрическая проницаемость характеризуется комплексной величиной:

$$\dot{\varepsilon} = \text{Re } \dot{\varepsilon} - i \text{Im } \dot{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' . \quad (8.3)$$

Вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε' определяет способность среды пропускать токи смещения. Произведение $\omega\varepsilon'$ можно рассматривать, как удельную электропроводность среды для токов смещения. От частоты ε' не зависит.

Кроме токов смещения в реальной среде возникают токи проводимости (аналоги токов утечки в конденсаторах в электротехнических цепях). Способность среды пропускать токи проводимости определяется мнимой частью диэлектрической проницаемости ε'' . Эта величина зависит от частоты поля и удельной электропроводности среды γ . Она равна γ/ω . Знак минус у мнимой части диэлектрической проницаемости в выражении (8.3) указывает на то, что токи проводимости отстают по фазе от токов смещения.

Степень влияния токов проводимости характеризуют тангенсом угла диэлектрических потерь, равным отношению мнимой и вещественной частей диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Im} \dot{\varepsilon}}{\operatorname{Re} \dot{\varepsilon}} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (8.4)$$

Если $\operatorname{tg} \delta < 0,3$, мнимой частью диэлектрической проницаемости ε'' в некоторых случаях можно пренебречь. При этом условии модуль комплексной диэлектрической проницаемости отличается от ее вещественной части меньше, чем на 5%. Пренебрежение мнимой частью $\dot{\varepsilon}$ означает пренебрежение поглощением энергии и затуханием поля в среде. Это возможно при очень высоком удельном сопротивлении среды, например, при изучении ледников.

В дальнейшем удобнее перейти от абсолютных значений магнитной проницаемости μ и диэлектрической проницаемости ε к их относительным значениям: $\mu_{\text{отн}} = \frac{\mu}{\mu_0}$ и $\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, где

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ Ф/м - величины этих параметров для вакуума. Тогда выражение волнового числа принимает вид:

$$k = \omega \sqrt{\dot{\mu}_{\text{отн}} \mu_0 \cdot \dot{\varepsilon}_{\text{отн}} \varepsilon_0} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\dot{\mu}_{\text{отн}} \dot{\varepsilon}_{\text{отн}}}, \quad (8.5)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света в вакууме. Так как

большинство горных пород слабомагнитны, для них можно не учитывать комплексный характер магнитной проницаемости и положить $\mu_{\text{отн}} \approx 1$. Тогда выражение (8.5) принимает вид:

$$k \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{\dot{\varepsilon}_{\text{отн}}}. \quad (8.6)$$

Вещественная часть волнового числа a и мнимая его часть b определяются выражениями:

$$a = \frac{\omega}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\dot{\varepsilon}_{\text{отн}}}, \quad (8.7)$$

$$b = \frac{\omega}{c} \operatorname{Im} \sqrt{\dot{\varepsilon}_{\text{отн}}}. \quad (8.8)$$

Вещественная часть волнового числа определяет волновые свойства поля – длину волны λ и фазовую скорость ее распространения V_ϕ :

$$\lambda = \frac{2\pi}{a} = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}'_{\text{отн}}}} = \frac{\lambda_0}{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}'_{\text{отн}}}}, \quad (8.9)$$

$$V_\phi = \frac{\omega}{a} = \frac{c}{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}'_{\text{отн}}}}. \quad (8.10)$$

В формуле (8.9) $\lambda_0=c/f$ - длина волны в вакууме, f – частота. В не очень сильно поглощающих средах разница между фазовой скоростью V_ϕ и групповой скоростью V небольшая и время t пробега зондирующим импульсом расстояния r можно определять как r/V_ϕ .

Мнимая часть волнового числа – это коэффициент затухания поля из-за поглощения энергии средой. Поглощение энергии вызывается тепловыми потерями при протекании через среду токов проводимости. Затухание поля на расстоянии r происходит по закону:

$$E = E_0 e^{-br}, \quad (8.11)$$

где E_0 – напряженность поля около источника.

8.3. Отражение радиоволн и прохождение через границу раздела. Дифракция радиоволн

При отражении радиоволн от границы раздела изменяется напряженность поля. Коэффициент отражения

$$k_{12} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}'_1} - \sqrt{\dot{\epsilon}'_2}}{\sqrt{\dot{\epsilon}'_1} + \sqrt{\dot{\epsilon}'_2}}. \quad (8.12)$$

Коэффициент отражения может быть как положительным, так и отрицательным. От его знака зависит соотношение фаз падающей и отраженной волн. При $\epsilon_2 < \epsilon_1$ коэффициент k_{12} положительный, и отраженный сигнал совпадает по фазе с падающим. Если $\epsilon_2 > \epsilon_1$, k_{12} отрицательный и отраженный сигнал изменяет фазу на противоположную (на π). Соответственно модулю ко-

эффциента отражения изменяется амплитуда отраженного сигнала по отношению к падающему импульсу.

Амплитуда сигнала, проходящего через границу раздела,

изменяется в соответствии с коэффициентом прохождения

$$T_{12} = 1 - k_{12} = 1 - \frac{\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}} = \frac{2\sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}} > 0. \quad (8.13)$$

Из выражения (8.13) следует, что прошедший через границу раздела сигнал всегда сохраняет фазу падающей волны.

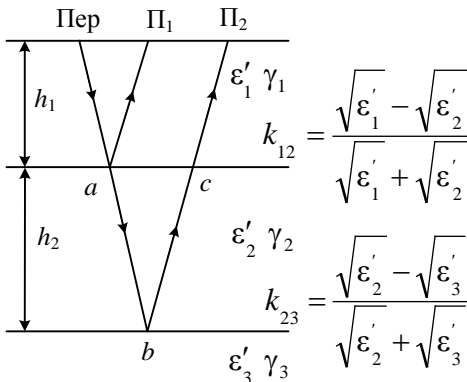


Рис. 8.2. Распространение зондирующего импульса в трехслойной среде

антенной им пульса E_0 . Амплитуда импульса на первой границе раздела (в точке a)

$$E_a = E_0 e^{-b_1 h_1}.$$

Отраженный от этой границы сигнал, принимаемый приемной антенной, имеет амплитуду

$$E_{П1} = E_0 k_{12} e^{-2b_1 h_1}.$$

Время прихода отраженного от первой границы сигнала $t_1 = 2h_1 V_1$.

Рассмотрим, как изменяется амплитуда сигнала при распространении от передающей (Пер) до приемной (П) антенны в трехслойной среде (рис. 8.2). Оговоримся, что на рисунке точки приема $П_1$ и $П_2$ разделены условно, лишь для большей наглядности. Реально это одна точка, так как оба сигнала принимаются одной антенной.

Обозначим амплитуду излучаемого передающей

После прохождения через второй слой (в точке b) амплитуда импульса уменьшается до

$$E_b = E_0 (1 - k_{12}) e^{-b_1 h_1} e^{-b_2 h_2}.$$

В точку c на границе слоев отраженный от нижней границы сигнал приходит с амплитудой

$$E_c = E_0 k_{23} (1 - k_{12}) e^{-b_1 h_1} e^{-2b_2 h_2}.$$

Пройдя через первую границу раздела в верхний слой амплитуда сигнала изменится в соответствии с коэффициентом прохождения $1 - k_{21} = 1 + k_{12}$ и после ослабления в верхнем слое на приемной антенне будет принят второй отраженный сигнал с амплитудой

$$E_{\Pi_2} = E_0 k_{23} (1 - k_{12}^2) e^{-2b_1 h_1} e^{-2b_2 h_2}.$$

Чтобы получить представление о величине потери энергии зондирующего импульса при распространении через среду от передающей до приемной антенны и о скорости распространения поля, зададим в рассматриваемом примере конкретные параметры слоев. Пусть $\varepsilon_{1\text{отн}}=4$, $\gamma_1=10^{-2}$ См/м, $\varepsilon_{2\text{отн}}=9$, $\gamma_2=2,5 \cdot 10^{-2}$ См/м, $\varepsilon_{3\text{отн}}=4$, $\mu_{1\text{отн}}=\mu_{2\text{отн}}=1$. Частоту примем равной 10^7 Гц. Так как величины ε' и ε'' при этих параметрах сопоставимы ($\text{tg}\delta > 0,3$), вещественную и мнимую части волнового числа надо рассчитывать по общим формулам [39]:

$$a = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{1/2}$$

$$b = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (8.14)$$

В нашем примере для первого слоя $a_1=0,701$ с/м, $b_1=0,563$ Нп/м, для второго слоя $a_2=1,041$ с/м, $b_2=0,853$ Нп/м. Скорость распространения поля в слоях:

$$V_1 = \frac{\omega}{a_1} = \frac{2\pi \cdot 10^7}{0,701} = 0,896 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

$$V_2 = \frac{\omega}{a_2} = \frac{2\pi \cdot 10^7}{1,041} = 0,604 \cdot 10^8 \text{ м/с}. \text{ Задав мощности слоев, мож-}$$

но найти время прихода на приемную антенну отраженных импульсов от первой и второй отражающих границ. Пусть мощности слоев $h_1=5$ м, $h_2=10$ м. Тогда

$$t_1 = \frac{2h_1}{V_1} = \frac{10}{0,896 \cdot 10^8} = 1,116 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 111,6 \text{ нс};$$

$$t_2 = \frac{2h_1}{V_1} + \frac{2h_2}{V_2} = 1,116 \cdot 10^{-7} + \frac{20}{0,604 \cdot 10^8} = 4,427 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 442,7 \text{ нс}.$$

Найдем амплитуду отраженных сигналов по отношению к амплитуде E_0 импульса, испускаемого передающей антенной. В нашем случае коэффициенты отражения

$$k_{12} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{отн1}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{отн2}}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{отн1}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{отн2}}}}} = \frac{2-3}{2+3} = -0,2; \quad k_{23} = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{отн2}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{отн3}}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{отн2}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{отн3}}}}} = 0,2.$$

Амплитуда сигнала, отраженного от первой отражающей границы

$$E_{\Pi_1} = E_0 e^{-2h_1 b_1} k_{12} = E_0 \cdot 0,00359 (-0,2) = -0,000718 E_0,$$

т. е. составляет 0,0718 % от амплитуды излучаемого сигнала. Знак минус указывает на изменение фазы волны на противоположную. Амплитуда сигнала, отраженного от второй отражающей границы,

$$\begin{aligned} E_{\Pi_2} &= E_0 \left(1 - k_{12}^2\right) k_{23} e^{-2h_1 b_1} e^{-2h_2 b_2} = \\ &= E_0 \cdot 0,96 \cdot 0,2 \cdot 0,00359 \cdot 3,9 \cdot 10^{-8} = 2,69 \cdot 10^{-11} E_0. \end{aligned}$$

Таким образом, даже в случае заданной в примере небольшой глубины исследования (всего 15 м) амплитуда сигнала, отраженного от нижней границы раздела, составляет ничтожную часть от амплитуды первоначального импульса. Этим объясняется необходимость применения в георадарных передатчиках, особенно при исследовании более значительных глубин, импульсов высокого напряжения – несколько киловольт или даже десятков киловольт.

Если отражающая граница достаточно протяженная, отраженные импульсы на соседних точках профиля коррелируются между собой, образуя ось синфазности, форма которой повторяет форму отражающей границы. Пример георадарограммы приведен на рис. 8.3. На рисунке видна очень интенсивная, на большей части профиля практически горизонтальная ось синфазности при $t \approx 25$ нс. По-видимому, она отражает поведение маломощного слоя рыхлых отложений. Несколько левее середины профиля ось синфазности образует резкий мульдообразный изгиб, отмечающий карстовую воронку.

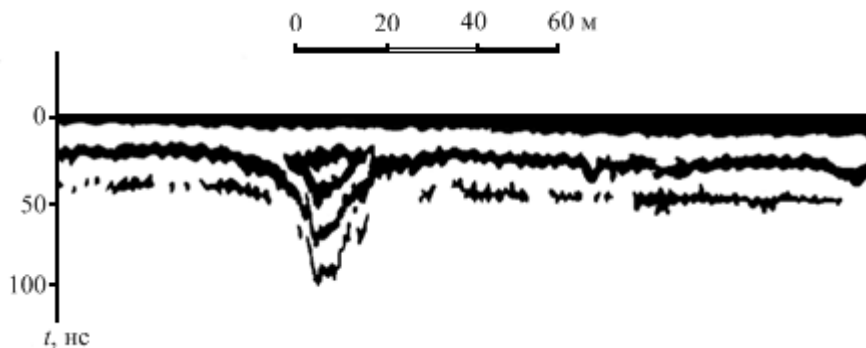


Рис. 8.3. Радиолокационный профиль (временной разрез) над карстовой воронкой (по М. И. Финкильштейну и др.)

При наличии в разрезе локальных неоднородностей, размеры которых меньше длины волны, на них происходит дифракция и образуются дифрагированные волны. При этом на радарограмме появляется характерная картина в виде параболической

ческих осей синфазности (рис. 8.4). По этому признаку может быть установлено наличие и местоположение таких объектов.

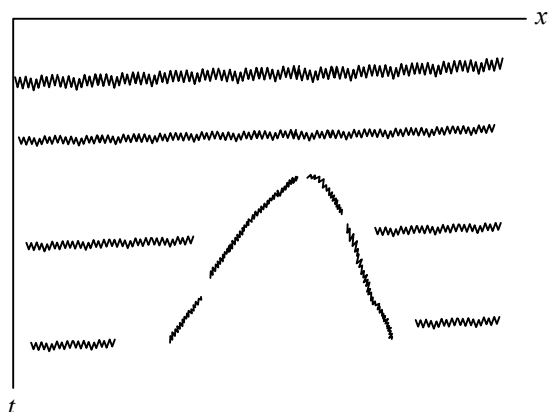


Рис. 8.4. Схематическая картина фрагмента георадарного профиля с дифрагированными волнами

При хорошо выраженных параболических осях синфазности может быть определена скорость распространения поля и электрические свойства среды между неоднородностью и поверхностью земли.

8.4. Методика работ и аппаратура

Для радиолокационного зондирования существует достаточно много моделей георадаров как отечественных, так и зарубежных. Для примера кратко рассмотрим георадар ГРОТ-11. Это низкочастотный георадар с рабочими частотами в диапазоне десятков мегагерц (центральная частота 15-75 МГц). Применение относительно низкой частоты позволяет при удельном сопротивлении пород порядка 100 Ом·м выполнять изучение разреза до глубины 80-100 м, но зато уменьшает разрешающую способность как по вертикали, так и по горизонтали.

По теоретическим оценкам разрешающая способность по вертикали составляет от 0,25 до 0,5 длины волны [34]. Напри-

мер, при $f=10$ МГц и $\epsilon'=9$ по формуле (8.9) $\lambda=10$ м. Следовательно, минимальное расстояние между двумя отражающими границами, которые могут быть выделены отдельно, составляет 2,5-5 м. В тех же условиях при частоте 100 МГц длина волны уменьшается до 1 м и разрешающая способность составляет 0,3-0,5 м.

Что касается разрешающей способности по горизонтали, то для того, чтобы отражающая граница была прослежена, надо чтобы ее протяженность была больше ширины первой зоны Френеля. При меньших горизонтальных размерах объекта над ним наблюдается только дифракционная картина и оценка размеров объекта невозможна.

Радиус зоны Френеля можно оценить по формуле

$$r = \sqrt{0,5\lambda h}. \quad (8.15)$$

В рассмотренном в предыдущем разделе примере верхний слой в разрезе имеет мощность 5 м, длина волны в нем

$\lambda = \frac{2\pi}{a} = \frac{2\pi}{0,701} = 9$ м. На уровне подошвы этого слоя ширина

зоны Френеля (два радиуса) равна $2\sqrt{0,5 \cdot 9 \cdot 5} = 9,5$ м. Следовательно, граница слоев может быть прослежена, если ее протяженность больше 10 м. В противном случае она будет давать только дифракционную картину и ее протяженность определена быть не может.

Таким образом, при выборе типа георадара следует учитывать необходимые глубину исследования и детальность изучения разреза.

Любой георадар состоит из передающей и приемной частей. В передающую часть входят передатчик и передающая антенна, в приемную часть приемник и приемная антенна. В георадаре ГРОТ-11 передатчик генерирует импульсы длительностью 3-5 нс. Напряжение импульсов 5-15 кВ при мощности порядка 1 МВт. Питание передатчика производится от встроенной батареи аккумуляторов напряжением 12 В. Принцип создания мощного импульса высокого напряжения состоит в том, что

осуществляется заряд конденсатора, который после достижения критического напряжения разряжается на передающую антенну.

Широкополосный приемник осуществляет прием отраженных от геологических неоднородностей сигналов, их фильтрацию, усиление, перевод в цифровую форму и запись в память. Он включает в себя антенный усилитель, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), устройство памяти, контроллер, панель управления и стабилизатор питания. Питание приемника осуществляется от выносной батареи аккумуляторов.

Перед началом измерения контроллер формирует сигнал включения стабилизатора питания и в соответствии с командами, полученными с панели управления или с компьютера, устанавливает режим работы всех устройств приемника. Он управляет работой усилителя, который согласовывает уровень поступающих с приемной антенны сигналов с динамическим диапазоном АЦП, устанавливает время задержки начала записи относительно переднего фронта импульса и порог срабатывания. После появления сигнала выше порога срабатывания контроллер запускает процедуру измерения и устройство памяти. Измеритель имеет жидкокристаллический индикатор, на который выводятся результаты измерений. Для дальнейшей обработки результаты измерений из памяти могут быть перекачаны в любой компьютер.

Передающая и приемная антенны делаются одинаковыми. Наиболее эффективными считаются резистивно-нагруженные антенны. Они состоят из нескольких отрезков коаксиального кабеля, между которыми симметрично, относительно входа (центра) антенны, впаяны безындукционные резисторы, сопротивления которых изменяются по определенной схеме (увеличиваются от центра к концам). В антеннах такой конструкции подавляется "звон", который маскирует слабые сигналы.

В комплект георадара ГРОТ-11 входят три низкочастотные антенны ЛОЗА-Н с центральными частотами 75, 25 и 15 меггерц. Длина антенн соответственно 3, 6 и 10 метров. Для обеспечения надежной изоляции от земли антенны помещаются в полиэтиленовые трубы. Антенны крепятся к кронштейнам,

соединенным рукояткой для удобства перемещения по профилю. При необходимости увеличения расстояния между антеннами рукоятка может быть отсоединена.

Общий вид развернутого комплекта аппаратуры ГРОТ-11 показан на рис. 8.5.

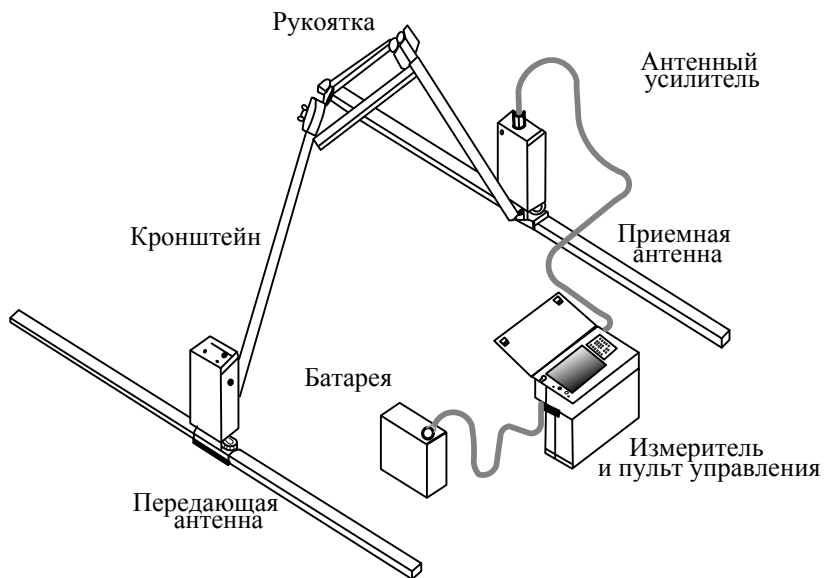


Рис. 8.5. Комплект аппаратуры ГРОТ-11

Работа с георадаром может выполняться в двух вариантах – по методике профилирования и зондирования. При профилировании расстояние между передающей и приемной антеннами все время остается постоянным. При зондировании измерения на точке выполняются при нескольких расстояниях между антеннами.

Способ профилирования. Размер антенн, которым определяется центральная частота, выбирается исходя из необходимой глубины исследования разреза и требуемой детальности (разрешающей способности). Расстояние между антеннами обычно берут равным длине антенн. Это расстояние имеет по-

рядок длины волны (промежуточная зона) и по результатам теоретических исследований и опытных работ является оптимальным. В процессе работы расстояние между антеннами должно выдерживаться строго постоянным. Для обеспечения выполнения этого требования перед началом работ должны быть проложены трассы для перемещения антенн (антенны располагаются параллельно профилю). Антенны при измерениях должны возможно плотнее прилегать к земле. Зазор между антеннами и землей не должен превышать первых сантиметров, иначе заметно ухудшается качество измерений.

Для обеспечения уверенного прослеживания отражающих границ шаг наблюдений не должен превышать 10-20 % радиуса зоны Френеля. В рассмотренном выше примере, когда радиус зоны Френеля составлял около 5 м, для надежного прослеживания верхней отражающей границы шаг не должен превышать 1 м.

По георадарограмме (временному разрезу), полученной по способу профилирования, устанавливается только форма отражающих границ. Определение глубин и электрических свойств слоев без привлечения дополнительной информации невозможно. Лишь при наличии дифрагирующего объекта могут быть определены скорость и диэлектрическая проницаемость среды между объектом и поверхностью земли и глубина расположения объекта. Характер получаемых при профилировании результатов иллюстрирует рис. 8.3.

Способ зондирования. В способе зондирования на точке выполняются измерения при нескольких расстояниях между антеннами. Это дает возможность получить годографы отраженных волн и по ним определить глубину до отражающих границ, скорость распространения электромагнитного поля и электрические свойства выделяемых слоев. Начальное расстояние между антеннами при длине антенн 6 м и более принимают равным 1 м, а при использовании антенн малой длины они располагаются вплотную. Методически было бы правильнее увеличивать расстояние между антеннами, перемещая их симметрично относительно точки зондирования в противоположных направлениях.

ях. Практически используют более технологичную методику: приемную антенну оставляют неподвижной, а перемещают только передающую антенну. Шаг перемещения обычно составляет 0,3-0,5 м. Расстояние между антеннами увеличивают до тех пор, пока фиксируются отраженные сигналы. Низкочастотные георадары позволяют увеличивать расстояние между антеннами до нескольких десятков метров. Измерения при зондировании при каждом расстоянии между антеннами выполняются так же, как при профилировании.

Точки зондирования располагаются на профилях, по которым выполняется профилирование. Количество зондирований определяется в зависимости от выдержанности геологического разреза и необходимой точности определения параметров слоев исходя из поставленных задач. При наличии на участке скважин, около них, как и при любых видах зондирования, следует выполнять параметрические зондирования.

8.5. Принцип обработки и интерпретации результатов

Прежде чем приступить к интерпретации результатов, георадарограммы анализируются на предмет наличия на них осей синфазности, связанных с помехами. Основных видов помех два – это так называемые воздушные помехи и кратные отражения. Воздушные помехи вызваны отражением радиоволн от расположенных вблизи профиля различных сооружений, отдельных деревьев и т. п. Эти помехи легко распознаются, если известна ситуация в районе профиля, которая всегда должна фиксироваться в процессе работы. Например, стена расположенного вблизи профиля здания вызывает появление горизонтальной оси синфазности, если она параллельна профилю. Если профиль и стена расположены под некоторым углом, на георадарограмме появляется наклонная ось синфазности. При известном расстоянии до стены не составляет труда идентифицировать с ней эту ось синфазности, так как скорость поля в воздухе известна. Предметы небольших размеров, такие как отдельное дерево или столб, вызывают появление дифракционной

картины, связь которой с этими объектами также не трудно установить, зная расстояние до них и скорость поля в воздухе.

Кратные отражения – это результат двухкратного (или более) отражения радиоволн от одной отражающей поверхности (рис. 8.6). В результате этого в простейшем случае на радарограмме появляются оси синфазности одинаковой формы, но отмечающиеся на разных (тоже кратных) временах. Амплитуда сигнала кратных отражений меньше амплитуды основного отражения.

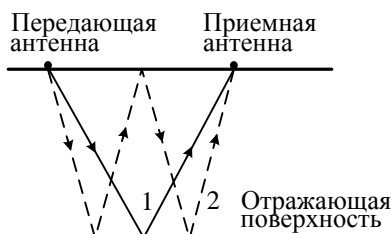


Рис. 8.6. Схема образования краткого отражения:
1 – основное отражение; 2 – краткое отражение

Результаты работ по методике профилирования, т. е. когда на каждой точке выполняется измерение при одном расстоянии между приемной и передающей антеннами, позволяют получить временной разрез (см. рис. 8.3). По этому разрезу можно установить наличие отражающих границ и определить их форму. Глубина и электрические свойства слоев в этом случае не определяются. Исключение составляет случай наличия на радарограмме осей синфазности дифрагированных волн. В этом случае можно построить годограф дифрагированной волны, позволяющий определить скорость распространения поля между объектом и поверхностью земли и определить глубину до объекта. По значению скорости определяется диэлектрическая проницаемость среды.

Определение параметров разреза можно выполнить аналитическим способом или методом подбора. Принцип аналитического способа будет описан ниже при описании интерпре-

тации результатов работ по методике зондирования. В способе подбора рассчитываются годографы для различных значений ϵ среды и по параметру теоретического годографа, с которым совмещается практический годограф, определяются диэлектрическая проницаемость, скорость распространения поля и глубина до отражающего объекта. Если есть основания полагать, что величина ϵ слоя меняется мало, найденную скорость можно использовать для определения глубины до отражающей границы в других точках профиля.

Величину диэлектрической проницаемости и скорость распространения поля в слоях можно определить, если на участке есть скважины. Зная глубину до отражающих границ и время прихода отраженных от них сигналов, несложно рассчитать скорость распространения волны в слоях.

При интерпретации результатов зондирования используют годограф – зависимость времени прихода отраженного сигнала от расстояния между антеннами. В случае одной отражающей границы

$$t = \frac{2\sqrt{(d/2)^2 + h_1^2}}{V_1} = 2 \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{отн}}}}{c} \sqrt{\frac{d^2}{4} + h_1^2}. \quad (8.16)$$

Так как синхронизация работы приемника и генератора осуществляется воздушной волной, начало регистрации отстает от момента излучения импульса на время d/c . С учетом этого отставания выражение годографа принимает вид:

$$t_{\text{изм}} = 2 \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{отн}}}}{c} \sqrt{\frac{d^2}{4} + h_1^2} - \frac{d}{c}, \quad (8.16')$$

т. е. измеренное время на величину d/c меньше истинного. В дальнейшем будем полагать, что поправка в значение времени введена, т. е. $t = t_{\text{изм}} + d/c$.

В случае одной отражающей границы для определения параметров разреза достаточно иметь результаты измерений при двух расстояниях между антеннами d_1 и d_2 , при которых получены значения времени t_1 и t_2 соответственно. По этим данным можно составить два уравнения:

$$\begin{cases} t_1 = 2 \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_{1\text{отн}}}}{c} \sqrt{\frac{d_1^2}{4} + h_1^2} \\ t_2 = 2 \frac{\operatorname{Re} \sqrt{\dot{\epsilon}_{1\text{отн}}}}{c} \sqrt{\frac{d_2^2}{4} + h_1^2} \end{cases}. \quad (8.17)$$

Решив эту систему уравнений, найдем глубину до отражающей границы

$$h_1 = \sqrt{\frac{t_1^2 d_2^2 - t_2^2 d_1^2}{4(t_2^2 - t_1^2)}}, \quad (8.18)$$

а затем диэлектрическую проницаемость верхнего слоя

$$\operatorname{Re} \dot{\epsilon}_{1\text{отн}} = \frac{t_1^2 c^2}{4h_1^2 + d_1^2}. \quad (8.19)$$

При малом угле диэлектрических потерь найденная величина $\operatorname{Re} \dot{\epsilon}_{1\text{отн}}$ близка к истинной диэлектрической проницаемости ϵ_1 . Если $\operatorname{tg} \delta$ большой, получается эффективное значение диэлектрической проницаемости. После того, как найдена диэлектрическая проницаемость, по формуле (8.10) можно определить скорость распространения поля V_1 в верхнем слое. Скорость распространения поля можно определить также с помощью формулы (8.1).

Если измерены амплитуды излучаемого E_0 и отраженного E сигналов, к системе можно добавить еще два уравнения:

$$\begin{cases} E_1 = E_0 k_{12} e^{-b_1 l_1} \\ E_2 = E_0 k_{12} e^{-b_1 l_2} \end{cases}, \quad (8.20)$$

где $l_1 = \sqrt{h_1^2 + d_1^2} / 4$, $l_2 = \sqrt{h_1^2 + d_2^2} / 4$ - длина пути импульса от передающей антенны до точки приема.

По найденной величине коэффициента затухания b_1 определяется удельное сопротивление верхнего слоя, а по коэффициенту

отражения k_{12} и ранее найденному значению ε_1 – диэлектрическая проницаемость нижнего слоя ε_2 .

Аналогичным образом могут быть проинтерпретированы результаты радиолокационного зондирования при нескольких отражающих границах, только тогда необходимо большее число уравнений, т. е. надо выполнить измерения при большем числе значений расстояния между антеннами (минимальное количество уравнений и значений d равно удвоенному числу слоев от поверхности земли до нижней отражающей границы).

Практически для большей надежности построения годографа и его интерпретации не ограничиваются минимально необходимым числом расстояний между антеннами, а увеличивают d и выполняют измерения до тех пор, пока удастся принимать отраженный сигнал.

При хорошо прослеживающейся отражающей границе можно, как и при интерпретации дифрагированных волн, рассчитывать теоретические годографы и выполнять интерпретацию практического годографа способом подбора.

8.6. Область применения радиолокационного зондирования

Основным параметром, по которому дифференцируются горные породы и иные объекты при радиолокационном зондировании является их диэлектрическая проницаемость. Для примера приведем заимствованные из работы [2, кн. 2] значения $\varepsilon_{\text{отн}}$ на частоте 100 МГц для некоторых сред:

Вода	80
Лед пресноводный	2,9-3,3
Лед морской	3,5
Почва сухая	3
Почва влажная	9
Почва очень влажная	15
Трещиноватые обводненные песчаники, известняки	7
Массивные изверженные и мерзлые осадочные породы	5

Наличие достаточного различия по диэлектрической проницаемости является необходимым условием выделения отражающих границ. Как следует из приведенной выше значений $\epsilon_{\text{отн}}$, при используемых частотах порядка десятков и сотен мегагерц большинство горных пород в сухом состоянии имеют $\epsilon_{\text{отн}}$ меньше 10. Величина ϵ существенно возрастает у водонасыщенных пород вследствие высокой диэлектрической проницаемости воды. Поэтому весьма благоприятные предпосылки радиолокационное зондирование имеет при гидрогеологических исследованиях, таких, как выявление и прослеживание водонесных горизонтов, определение уровня грунтовых вод и т. п.

Метод имеет хорошие предпосылки при инженерно-геологических исследованиях для изучения характера грунтов. Например, глины среди других образований выделяются более высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\text{отн}} \approx 20$), так как практически всегда содержат воду. Радиолокационным зондированием хорошо выделяются карстовые полости (см. рис. 8.3), старые горные выработки. Исключительно благоприятны предпосылки для изучения мощности ледников. Из-за высокого сопротивления льда коэффициент поглощения в нем очень мал, и глубина исследований может достигать многих сотен метров.

Высокочастотные георадары находят широкое применение при изучении самой верхней части разреза. С их помощью изучается состояние дорожных покрытий и насыпей. Они используются для определения точного местоположения различных подземных коммуникаций (кабелей, трубопроводов и т. п.) в случае утери планов их расположения. В археологии радиолокационное зондирование используется для установления положения погребенных стен и фундаментов, мест захоронений, поисков различных предметов. Может радиолокационное зондирование применяться для изучения состояния стен и фундаментов различных сооружений.

Радиолокационное зондирование с низкочастотными георадарами может использоваться для поисков неглубоко залегающих месторождений полезных ископаемых и определения их контуров до глубины 80-100 м. В качестве примера на рис. 8.7

приведен пример определения по результатам георадиолокационного зондирования положения и контуров кимберлитовой трубки. В этом примере верхняя часть разреза, сложенная четвертичными и среднекаменноугольными отложениями, характеризуется большим числом отражающих границ (на рисунке показана только часть из них). Очень четко определяется граница между среднекаменноугольными и верхнепротерозойскими отложениями. В протерозойских отложениях уверенно определяется контур кимберлитовой трубки. Данные радиолокационного зондирования хорошо согласуются с результатами бурения.

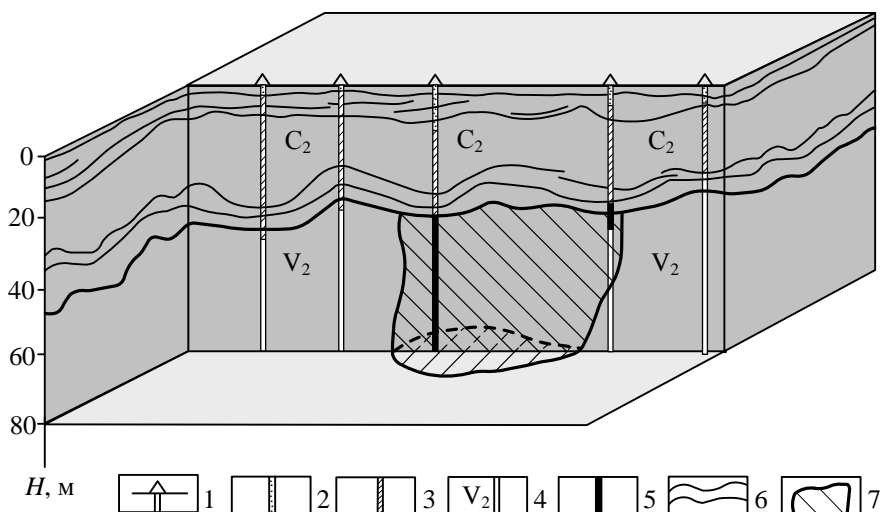


Рис. 8.7. Пример трехмерной интерпретации результатов радиолокационного зондирования: блок-диаграмма с вертикальным разрезом и планом на горизонте 80 м (по материалам Александровкой опытно-методической экспедиции).

1 – скважины; 2 – четвертичные отложения; 3 – отложения среднего карбона; 4 – верхнепротерозойские (вендские) отложения; 5 – кимберлиты; 6 – отражающие горизонты (показаны не все); 7 – кимберлитовая трубка по данным радиолокационного зондирования

Таким образом, радиолокационное зондирование может использоваться при решении разнообразных геологических и инженерных задач. История метода не насчитывает и полувека,

он продолжает развиваться и, надо полагать, область его применения в дальнейшем будет расширяться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мере развития теоретической, методической и аппаратной базы расширяются возможности и области применения электроразведки. У нее большие перспективы при поисках углеводородного сырья, в инженерной геологии, при решении разнообразных инженерных задач негеологического характера. Далеко не исчерпаны возможности электроразведки и в традиционных областях – в рудной геофизике, при геологическом картировании, при гидрогеологических исследованиях. Важной чертой электроразведки является то, что ее применение практически не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

Хотелось бы надеяться, что некоторые читатели заинтересуются затронутыми в пособии вопросами, требующими развития, и займутся их дальнейшей разработкой.

Автор выражает благодарность кафедре геофизики УГГУ, создавшей благоприятные условия для работы. Особую благодарность автор выражает инженеру Г. А. Косаревой, взявшей на себя труд оформления рисунков и окончательной компьютерной верстки книги. Без ее помощи эта книга едва ли могла быть закончена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. *Редозубов А. А.* Электроразведка: учебное пособие. В двух частях. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007 и 2008. Ч. первая 328 с.; ч. вторая 188 с.

2. *Электроразведка.* Справочник геофизика. В двух книгах / под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. Кн. первая 378 с.; кн. вторая 438 с.

3. *Якубовский Ю. В., Ренард И. В.* Электроразведка: учебн. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1991. 359 с.

Дополнительный

4. *Бобровников Л. З., Орлов Л. И., Попов В. А.* Полевая электроразведочная аппаратура: справочник. М.: Недра, 1986. 223 с.

5. *Виноградов А. М.* Геополя и колчеданы Южного Урала. Екатеринбург: Изд-во Института геофизики УрО РАН, 2004. 185 с.

6. *Голод М. И.* Геофизические методы при поисках тектонических пегматитоносных зон. Л.: Наука, 1978. 112 с.

7. *Губатенко В. П.* Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 4. С. 88-98.

8. *Гудков А. С., Киевленко Е. Я., Кондрашев С. Н.* Основы поисков и разведки месторождений пьезооптических минералов. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 219 с.

9. *Гуревич Ю. М.* Оптимальный градиент-зонд для электрокаротажа на рудных месторождениях Среднего Урала // Методические вопросы рудной геофизики Урала. Геофизический сборник № 4. Свердловск: Изд-во Института геофизики Уф АН СССР, 1965. С. 183-186.

10. *Дахнов В. Н.* Электрическая разведка методом спир. М.: Гостоптехиздат, 1947.

11. *Инструкция по электроразведке*. Л.: Недра, 1984. 352 с.
12. *Интерпретация данных МПП с помощью палеток (методические рекомендации)* / М. П. Седов, С. Н. Шерешевский, Л.: Изд-во ВИРГ, 1972. 44 с.
13. *Каменецкий Ф. М.* Электромагнитные геофизические исследования методом переходных процессов. М.: Геос, 1997. 162 с.
14. *Каменецкий Ф. М., Тимофеев В. М., Мамаев В. А.* Аэроэлектроразведка методом переходных процессов. М.: Недра, 1978. 64 с.
15. *Карасев А. П., Птицын А. Б., Юдицких Е. Ю.* Быстрые переходные процессы вызванной поляризации. Новосибирск: Наука, 2005. 291 с.
16. *Комаров В. А.* Электроразведка методом вызванной поляризации. 2-е изд., перераб и доп. Л.: Недра. 1980. 391 с.
17. *Кормильцев В. В., Семенов В. Д.* Электроразведка методом заряда. М.: Недра, 1974. 232 с.
18. *Методические рекомендации по детализационным исследованиям методом переходных процессов с незаземленными и заземленными источниками поля* / под ред. В. Ф. Сарбаша. Алма-Ата. Изд-во КазВИРГ, 1984. 124 с.
19. *Моисеев В. С.* Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. Новосибирск: Наука, 2002. 136 с.
20. *Овчинников И. К.* Теория поля: учебн. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1979. 352 с.
21. *Овчинников И. К.* Электроразведка рудных объектов под верхним слоем земной коры. М.: Недра. 1975. 88 с.
22. *Применение временных характеристик ранней стадии вызванной поляризации при поисках сульфидных месторождений* / А. П. Карасев, А. С. Сейфуллин, О. В. Бумагин, В. И. Красников. М.: Недра, 1973. 128 с.
23. *Редозубов А. А.* К вопросу об экранирующем влиянии проводящего приповерхностного слоя при поисках локальных объектов // Вопросы рудной геофизики. Вып. 105. Труды Сверд-

ловского горного института. Свердловск: Изд-во СГИ, 1973. С. 56-66.

24. *Редозубов А. А., Сысков С. С., Каплан В. Е. [и др.]* Применение планшетов больших размеров при поисках колчеданных месторождений на Среднем Урале // Методика поисков и разведки глубокозалегающих рудных месторождений. Вып. 128. Свердловск: Изд-во Свердловского горного института, 1975. С. 42-52.

25. *Родионов П. Ф., Краснобаева А. Г.* Основные особенности геоэлектрического строения колчеданных месторождений Урала, // Методические вопросы рудной геофизики Урала. Геофизический сборник № 4. Свердловск: Изд-во Уральского филиала АН СССР, 1965. С. 155-168.

26. *Руководство по применению метода переходных процессов в рудной геофизике* / под ред. Ф. М. Каменецкого. Л.: Недра, 1976. 128 с.

27. *Рысс Ю. С.* Поиски и разведка рудных тел контактным способом поляризационных кривых. Л.: Недра, 1973. 168 с.

28. *Саковцев Г. П., Поткин Ф. М., Редозубов А. А.* Геолого-геофизическая характеристика Ново-Шайтанского месторождения в Кировградском районе на Среднем Урале // Известия вузов. Серия цветная металлургия, 1958. № 10. С. 3-10.

29. *Саковцев Г. П., Редозубов А. А.* Методы скважинной электроразведки при поисках и разведке рудных месторождений. М.: Недра, 1968. 128 с.

30. *Сафонов А. С.* Высокоразрешающая электроразведка (аномальные явления, регистрируемые переходными характеристиками электромагнитного поля) // Разведочная геофизика. М.: АОЗТ "Геоинформмарк", 1995. 63 с.

31. *Семенов М. В.* Основы поисков и изучения колчеданно-полиметаллических рудных полей геофизическими методами. Л.: Недра. 1975. 152 с.

32. *Сидоров В. А.* Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.

33. *Скважинная и шахтная рудная геофизика: справочник геофизика* / под ред. В. В. Бродового. Книга вторая. М.: Недра. 1988. 440 с.
34. *Старовойтов А. В.* Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.
35. *Финкельштейн М. Н., Кутев В. А., Золотарев В. П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.
36. *Чантуришвили Л. С.* Электроразведка при проектировании дорог на пересеченной местности. М.: Автотрансиздат, 1959. 98 с.
37. *Шейнманн С. М.* Современные физические основы теории электроразведки. Л.: Недра, 1969. 224 с.
38. *Шейнманн С. М.* Элементы теории электроразведки анизотропных сред. // Материалы ВСЕГЕИ. Геофизика. Сб. 9-10. М.: Госгеолиздат, 1941. С. 105-144.
39. *Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике* / под ред. С. М. Шейнманна. М.: Недра, 1966. 308 с.
40. *Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями* / А. С. Нахабцев, Б. Г. Сапожников, А. И. Яблчанский. Л.: Недра. 1985, 96 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....	4
1.1. Геоэлектрическая модель, её содержание.....	4
1.2. Исходные данные для формирования геоэлектрической модели.....	9
1.3. Обработка результатов измерений электрических свойств горных пород.....	16
1.4. Геоэлектрические ореолы месторождений полезных ископаемых.....	23
1.5. Геоэлектрические ореолы колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений.....	24
1.6. Геоэлектрические ореолы месторождений других твердых полезных ископаемых.....	32
1.7. Геоэлектрические ореолы и модели месторождений углеводородов.....	33
1.8. Примеры электроразведочных аномалий, вызванных ореолами месторождений углеводородов.....	38
2. МЕТОДЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И ИЗУЧЕНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	48
2.1. Общие положения.....	48
2.2. Аномалия от шара в поле точечного источника тока... ..	48
2.3. Аномалия от хорошо проводящего шара.....	50
2.4. Учет границы раздела "земля-воздух" в присутствии шара.....	53
2.5. Кажущееся сопротивление в присутствии шара. Оценка необходимого размера установки.....	54
2.6. Зависимость аномалии от ориентировки поля относительно неизометричного локального объекта.....	57
2.7. Электропрофилирование над изометричными проводящими объектами.....	63
2.8. Профилирование над линзовидными проводящими объектами.....	72
2.9. Профилирование над плохо проводящими объектами.....	77
2.10. Графики ρ_k над приповерхностными неоднородностями.....	79

2.11.	Характеристика модификаций электропрофилирования применительно к поискам локальных объектов....	87
2.12.	Электрическое зондирование с симметричной установкой (ВЭЗ) над локальными объектами в однородной среде.....	89
2.13.	Электрическое зондирование над приповерхностными объектами.....	93
2.14.	Электрическое зондирование над локальными объектами в двухслойной среде.....	96
2.15.	Другие модификации зондирования при поисках локальных объектов.....	103
2.16.	Электрическое профилирование с незаземленными линиями.....	110
2.17.	Влияние электропроводного приповерхностного слоя на результаты электроразведки.....	118
3.	ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И МЕТОД ЗАРЯДА С ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РУДНОЙ ГЕОФИЗИКЕ.....	126
3.1.	Общие сведения.....	126
3.2.	Метод изолиний.....	126
3.3.	Методы компенсации и вертикального поля.....	131
3.4.	Применение установок больших размеров для поисков геоэлектрических ореолов месторождений.....	135
3.5.	Метод заряда с измерением электрического и магнитного поля.....	141
4.	ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ.....	151
4.1.	Модификации электрохимических методов.....	151
4.2.	Метод вызванной поляризации в модификациях срединного градиента и симметричного профилирования.....	152
4.3.	Метод вызванной поляризации с установками комбинированного и дипольного профилирования.....	164
4.4.	Зондирование по методу вызванной поляризации.....	167
4.5.	Метод центрального электрода.....	172
4.6.	Скважинные модификации метода вызванной поляризации.....	174
4.7.	Поведение тока в питающей линии и ΔU на приемных электродах в процессе зарядки. Токовый вариант метода ВП.....	181

4.8.	Временные характеристики вызванной поляризации. Дифференциальная кажущаяся поляризуемость.....	185
4.9.	Поверхностная вызванная поляризация.....	194
4.10.	Нелинейная вызванная поляризация.....	200
4.11.	Измерение вызванной поляризации на переменном токе.....	204
4.12.	Изучение ранней стадии вызванной поляризации.....	207
4.13.	Контактный способ поляризационных кривых (КСПК).....	216
5.	ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ.....	225
5.1.	Анизотропия горных пород и ее геологическая при- рода.....	225
5.2.	Решение задачи об электрическом поле точечного источника в анизотропной среде.....	231
5.3.	Особенности электрического поля в анизотропной среде.....	233
5.4.	Выражение потенциала в системе координат с осями x и y, ориентированными горизонтально.....	237
5.5.	Учет границы раздела "земля-воздух".....	241
5.6.	Форма изолиний потенциала на поверхности анизо- тропного полупространства.....	245
5.7.	Кажущееся сопротивление в анизотропной среде.....	248
5.8.	Анизотропия поляризуемости.....	253
6.	ИЗУЧЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД. ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ КОНДУКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ.....	257
6.1.	Определение параметров анизотропной среды.....	257
6.2.	Картирование анизотропных пород.....	264
6.3.	Влияние анизотропии пород на результаты методов сопротивлений и заряда.....	276
6.4.	Оценка и учет влияния анизотропии пород на резуль- таты методов сопротивлений и заряда.....	290
6.5.	Примеры использования результатов изучения анизо- тропии горных пород для решения геологических задач.....	300
6.6.	Изучение анизотропии поляризуемости и ее влияние на результаты метода вызванной поляризации.....	307
6.7.	Использование результатов изучения анизотропии поляризуемости для классификации аномалий.....	312

7. МЕТОДЫ СТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ...	317
7.1. Принцип методов становления поля и их модификации.....	317
7.2. Определение кажущегося удельного сопротивления и кажущейся продольной проводимости.....	324
7.3. Зондирование становлением поля в ближней зоне.....	328
7.4. Принципы интерпретации результатов ЗСБ.....	329
7.5. Метод переходных процессов и его модификации.....	338
7.6. Аномалии от локальных проводящих объектов в среде с высоким сопротивлением.....	339
7.7. Оценка параметров вмещающей среды. Влияние вмещающей среды на аномалии от локальных объектов.....	344
7.8. Выделение аномалий от локальных объектов при сильном влиянии вмещающей среды. Зондирование методом переходных процессов.....	350
7.9. Детализационные исследования методом переходных процессов.....	354
7.10. Аэровариант метода переходных процессов (АМПП)..	366
7.11. Методика работ методом переходных процессов.....	371
7.12. Взаимное влияние индукционных неустановившихся процессов и вызванной поляризации.....	380
8. РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.....	387
8.1. Принцип радиолокационного зондирования.....	387
8.2. Распространение радиоволнового поля в земле.....	389
8.3. Отражение радиоволн и прохождение через границу раздела. Дифракция радиоволн.....	391
8.4. Методика работ и аппаратура.....	396
8.5. Принцип обработки и интерпретации результатов....	401
8.6. Область применения радиолокационного зондирования.....	405
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	408
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	409

Учебное издание

Авенир Александрович Редозубов

СПЕЦИАЛЬНЫЙ КУРС ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

Учебное пособие

Редактор Л. Н. Авдеева
Компьютерная верстка Г. А. Косаревой

Подписано в печать 04.05.2010 г.
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Печ. л. 26,0. Уч.-изд. л. 21,1. Тираж 150. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет