

Глава 4 ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Электроразведка (электрическая, или точнее электромагнитная разведка) объединяет физические методы исследования геосфер Земли, поисков и разведки полезных ископаемых, основанные на изучении электромагнитных полей, существующих в Земле в силу естественных космических, атмосферных или физико-химических процессов или созданных искусственно. Электромагнитные поля могут быть:

1) установившимися, т.е. существующими свыше 1 с, постоянными и переменными (гармоническими или квазигармоническими) частотой от миллигерц ($1 \text{ мГц} = 10^{-3} \text{ Гц}$) до петагерц ($1 \text{ ПГц} = 10^{15} \text{ Гц}$);

2) неустановившимися, импульсными с длительностью импульсов от микросекунд до секунд. Используемые гармонические поля можно разделить на инфразвуковые, звуковые, радиоволновые, изучаемые в электроразведке, и микрорадиоволновые, на которых основаны методы терморазведки (см. гл. 6). Измеряемыми параметрами поля являются амплитуды и фазы электрических E и магнитных H полей, а при терморазведке—температуры T .

Интенсивность и структуру естественных полей определяют природные факторы и электромагнитные свойства горных пород. Для искусственных полей она зависит от этих же свойств горных пород, интенсивности и вида источника, а также способов возбуждения. Последние бывают гальваническими, когда поле в Земле создают с помощью тока, пропускаемого через электроды-заземлители; индуктивными, когда питающий ток, проходя по незаземленному контуру (петля, рамка), создает в среде электромагнитное поле за счет индукции, и смешанными (гальваническими и индуктивными).

К электромагнитным свойствам горных пород относятся удельное электрическое сопротивление ρ , величина, ей обратная,—удельная электропроводность ($\gamma = 1/\rho$), электрохимическая активность α , поляризуемость η , диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости, а также пьезоэлектрические модули d . Электромагнитными свойствами геологических сред и их геометрическими параметрами определяются геоэлектрические разрезы. Геоэлектрический разрез однородного по тому или иному электромагнитному свойству полупространства принято называть нормальным, а неоднородного — аномальным.

Изменение глубинности электроразведки достигают изменением мощности источников и способов создания поля. Однако ею можно управлять также дистанционными и частотными приемами. Сущность дистанционного приема увеличения глубинности сводится к увеличению расстояния между источником поля и точками, в которых его измеряют. Это приводит к увеличению глубинности разведки, так как увеличивается объем среды, в которой поле распространяется, а его искажение глубинными неоднородностями проявляется на больших расстояниях от источника. Частотный принцип увеличения глубинности основан на скин-эффекте, т.е. прижимании поля к поверхности Земли в слое тем меньшей толщины, чем выше частота гармонического поля f и меньше время t при импульсном создании поля. Наоборот, чем меньше частота, больше период колебания $T = 1/f$ и больше время распространения (диффузии) поля, называемого также временем становления поля или переходного процесса, тем больше глубинность разведки. В целом глубинность электроразведки изменяется от десятков километров на инфранизких частотах до десятков сантиметров на частотах гигагерцы (ГГц)—тетрагерцы (ТГц).

В табл. 4, 5 приведены физическая и целевая (прикладная) классификации методов электроразведки. Вследствие многообразия используемых полей, свойств горных пород электроразведка отличается от других геофизических методов большим числом

(свыше 50) методов. Их можно сгруппировать в методы естественного переменного электромагнитного поля, гео электрохимические, сопротивлений, электромагнитные и радиоволновые зондирования и профилирования, пьезоэлектрические, радиолокационные зондирования, а также радиотепловые, инфракрасные и спектрометрические съемки, которые хотя и принято относить к терморазведке, но по природе полей, методике и технике измерений они близки к электроразведке.

Таблица 4. Физическая классификация методов электроразведки

Частота		Вид излучения	Изучаемый параметр		Ориентировочная глубинность, м
f	$lg f$		поля	пород	
1 мГц 1 Гц	- 3 0	Инфразвуковое	H, E	ρ, α, η	1000
1 кГц	3	Звуковое	E	ρ	100
1 МГц	6	Радиоволновое	H, E	$d, \rho, \varepsilon, \mu$	10
1 ГГц	9	Микрорадиоволновое	H, T	Электромагнитный, тепловой, оптический	10
1 ТГц	12	Инфракрасное	Отражательная способность		1
1 ПГц	15	Оптическое			

Таблица 5. Целевая классификация методов электроразведки

Метод	Вид работ		
	региональные	разведочные	инженерно-геологические
Естественного переменного поля	+++	+	+
Геоэлектрохимические	+	+++	++
Сопротивлений	+	++	+++
Электромагнитное зондирование и профилирование	++	++	++
Пьезоэлектрический	—	+++	+
Радиоволновое зондирование и профилирование	—	++	++
Радиолокационное зондирование	—	+	+
Радиотепловой	+	+	+
Инфракрасная и спектрометрическая съемки	+	+	+

Примечание: «+», «++», «+++» — малая, средняя, большая степень применимости соответственно.

По общему строению изучаемых геоэлектрических разрезов методы электроразведки принято подразделять:

- а) на зондирования, которые служат для расчленения горизонтально (или полого) слоистых разрезов;
- б) на профилирования, предназначенные для изучения крутослоистых разрезов или выявления локальных объектов;
- 3) на подземные, объединяющие методы для выявления неоднородностей между горными выработками и земной поверхностью.

Электроразведку с той или иной эффективностью применяют для решения практически всех задач, для которых используют и другие геофизические методы. В част-

ности, с помощью естественных переменных полей космического происхождения разведывают земные недра до глубин около 500 км и ведут изучение осадочных толщ, кристаллических пород, земной коры, верхней мантии. Электромагнитные зондирования используют при глубинных и структурных исследованиях, поисках нефти и газа. Электромагнитные профилирования применяют при картировочно-поисковых съемках, поисках рудных, нерудных полезных ископаемых и угля. Малоглубинные электромагнитные зондирования и профилирования используют при инженерно-геологических исследованиях и охране геологической среды, а подземные методы служат для разведки рудных месторождений.

По технологии и месту проведения работ различают аэрокосмические, полевые (наземные), акваториальные (морские, речные), подземные (шахтно-рудничные) и скважинные (межскважинные) методы электроразведки.

4.1 Физико-математические и геологические основы электроразведки

Физико-математическая теория электроразведки базируется на теории электромагнитного поля и, в частности, на теории постоянных и переменных электромагнитных полей. Подобно тому как в основе теории грави- и магниторазведки лежат законы Ньютона и Кулона, в основе теории электроразведки лежат уравнения Максвелла. Если геоэлектрический разрез известен, то с помощью дифференциальных уравнений, получаемых из системы уравнений Максвелла, и физических условий решают прямые задачи электроразведки для ряда физико-геологических моделей среды, т.е. получают аналитические выражения для тех или иных компонентов поля над такими моделями. Если эти компоненты получены в результате электроразведки, то на основе прямых решают обратные задачи электроразведки, т.е. определяют те или иные параметры модели. Таким образом, при решении прямых и обратных задач электроразведки прежде всего приходится иметь дело с геоэлектрическим разрезом, который определяют электромагнитные свойства и геометрические параметры среды.

4.1.1 Электромагнитные свойства горных пород

Как отмечалось выше, к электромагнитным свойствам горных пород относятся удельное электрическое сопротивление ρ , электрохимическая активность α , поляризуемость η , диэлектрическая ϵ и магнитная μ проницаемости, а также пьезоэлектрические модули d .

Удельное электрическое сопротивление горных пород. Удельное электрическое сопротивление ρ , измеряемое в ом-метрах (Ом·м), является наиболее известным электромагнитным свойством и изменяется для горных пород и руд в очень широких пределах: от 10^{-5} до 10^{15} Ом·м. Для наиболее распространенных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород оно зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, а также от некоторых других факторов (температуры, глубины залегания, степени метаморфизма, техногенных воздействий и др.).

1. Удельное электрическое сопротивление минералов зависит от их внутрискристаллических связей. Для минералов-диэлектриков (кварц, слюды, полевые шпаты и др.) с преимущественно ковалентными связями характерны очень высокие сопротивления (10^{12} — 10^{15} Ом·м). Минералы-полупроводники (карбонаты, сульфаты, галоиды и др.) имеют ионные связи и отличаются высокими сопротивлениями (10^4 — 10^8 Ом·м). Глинистые минералы (гидрослюды, монтмориллонит, каолинит и др.) обладают ионно-ковалентными связями и характеризуются достаточно низкими сопротивлениями ($\rho < 10^4$ Ом·м). Рудные минералы (самородные, некоторые оксиды) с электронной про-

водимостью очень хорошо проводят ток ($\rho < 1$ Ом·м). Первые две группы минералов составляют «жесткий» скелет большинства горных пород. Глинистые минералы создают «пластичный» скелет. Характерно, что «пластичные» минералы способны адсорбировать связанную воду, а породы с «жесткими» минералами могут насыщаться лишь свободной водой.

2. Удельное электрическое сопротивление свободных подземных вод (гравитационных и капиллярных) изменяется от долей Ом·метра при высокой общей минерализации ($M > 10$ г/л) до 1000 Ом·м при низкой минерализации ($M < 0,01$ г/л) и может быть оценено по формуле $\rho_B \approx 8,4/M$. Химический состав растворенных в воде солей не играет существенной роли, поэтому по данным электроразведки можно судить лишь об общей минерализации подземных вод. Удельное электрическое сопротивление связанных подземных вод низкое и изменяется от 1 до 10 Ом·м, что объясняют достаточно постоянной их минерализацией (3—1 г/л), близкой к средней минерализации вод Мирового океана.

Так как поровая влага (свободная и связанная) отличается значительно более низким удельным электрическим сопротивлением, чем минеральный скелет, то сопротивление большинства горных пород практически не зависит от его минерального состава, а определяется такими факторами, как пористость, трещиноватость, водонасыщенность, с увеличением которых сопротивление пород уменьшается.

3. При возрастании температуры на 40°C сопротивление уменьшается примерно в 2 раза. Это объясняют увеличением подвижности ионов. При замерзании сопротивление горных пород возрастает скачком, так как свободная вода становится практически изолятором, а электропроводность определяется лишь связанной водой, которая замерзает при очень низких температурах (ниже —50 °C). Степень возрастания сопротивлений при замерзании для разных пород различна: в несколько раз она увеличивается у глин; до 10 раз — у скальных пород; до 100 раз — у суглинков и супесей; до 1000 раз и более — у песков и грубообломочных пород.

4. Глубина залегания, степень метаморфизма, структура и текстура породы также влияют на ее сопротивление, изменяя коэффициент микроанизотропии $\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_l}$ где ρ_n, ρ_l —сопротивления породы вкрест и вдоль слоистости. Чаще всего λ изменяется от 1 до 1,5, достигая 2—3 у сильно рассланцованных пород.

Несмотря на широкий диапазон изменения удельных электрических сопротивлений у разных пород, основные закономерности установлены достаточно четко. Изверженные и метаморфические породы характеризуются высокими сопротивлениями (от 500 до 10000 Ом·м). Среди осадочных пород высокие сопротивления (100 — 1000 Ом·м) у каменной соли, гипсов, известняков, песчаников и некоторых других пород. Обломочные осадочные породы, как правило, имеют тем большее сопротивление, чем больше размер зерен, слагающих породу. При переходе от глин к суглинкам, супесям и пескам удельное сопротивление изменяется от долей и первых единиц до первых десятков и сотен Ом метров.

Электрохимическая активность и поляризуемость. Под электрохимической активностью понимают свойство пород создавать естественные постоянные электрические поля. Эти поля могут возникать в силу окислительно-восстановительных реакций, связанных с наличием и движением в породах растворов разной концентрации и химического состава.

1. За электрохимическую активность иногда принимают коэффициент пропорциональности между напряженностью естественного электрического поля и основными факторами, которыми оно обусловлено (отношением концентраций подземных вод, давлением и др.). Коэффициент α измеряют в милливольтках. Он составляет —(10 — 15)

мВ для чистых песков, близок к нулю для скальных пород, возрастает до 20 — 40 мВ для глин и до сотен милливольт для руд с электронно-проводящими минералами. В целом α зависит от многих природных факторов (минерального состава, глинистости, пористости, проницаемости, влажности, минерализации подземных вод и др.).

2. Способность пород поляризоваться, т.е. накапливать заряд при пропускании тока, а затем разряжаться после его отключения, оценивают коэффициентом поляризуемости η . Значение η вычисляют в процентах, как отношение напряжения $\Delta U_{ВП}$, которое остается в измерительной линии по истечении определенного времени (обычно 0,5 — 1 с) после размыкания токовой цепи к напряжению ΔU в той же линии при пропускании тока

$$\eta = (\Delta U_{ВП} / \Delta U) \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Поляризация—это сложный электрохимический процесс, протекающий при пропускании через породу постоянного или низкочастотного переменного (до 20 Гц) тока. Наибольшей поляризуемостью ($\eta = 6 — 40\%$) отличаются руды с электронной проводимостью (сульфиды, сульфосоли, некоторые самородные металлы и отдельные оксиды). Возникновение вызванных потенциалов в этой группе пород объясняют так называемой электродной поляризацией руд в присутствии подземных вод. Коэффициенты поляризуемости до 2—6 % наблюдаются над обводненными рыхлыми осадочными породами с примесью глинистых частиц. В этих породах при пропускании тока происходит перераспределение и диффузия зарядов, адсорбированных на глинистых частицах. Возвращение среды в состояние равновесия после отключения тока сопровождается эффектом вызванной поляризации. Большинство изверженных и метаморфических пород, как правило, не поляризуется; у них $\eta = 1 — 2\%$ (редко 3%). Слабо поляризуются осадочные породы, насыщенные минерализованной водой.

Пьезоэлектрические модули. Пьезоэлектрическими модулями определяется свойство минералов и горных пород создавать электрическую поляризацию, т.е. определенную ориентацию зарядов, при механическом воздействии на них. Пьезоэлектрическими свойствами обладают лишь кристаллы, лишенные центра симметрии. У таких кристаллов при механической деформации происходит взаимное смещение центров электрических диполей и на соответствующих гранях кристаллов появляются электрические заряды. Интенсивность и знак зарядов q зависят от вида деформации (растяжение — сжатие или сдвиг), величины и направления действующей механической силы F и пьезоэлектрического модуля кристалла d , соответствующего данному виду деформации и направлению поляризации.

Связь между этими параметрами описывают формулой $q = d \cdot F$. Действующая сила может иметь девять составляющих $F_{i,j}$ где $i, j = x, y, z$, т.е. существует девять компонентов тензора механических напряжений или деформаций. Объясняют это тем, что на каждую из трех граней кристалла, совпадающих с координатными плоскостями, может действовать сила, имеющая три составляющие, направленные вдоль осей координат. В связи с этим пьезоэлектрический модуль кристалла может определяться этими девятью механическими тензорами и тремя составляющими вектора поляризации, совпадающими с осями координат. Таким образом, каждый кристалл можно описывать 27 пьезоэлектрическими модулями $d_{i,j,k}$ где $i, j, k = x, y, z$.

Кроме модуля d существуют и другие пьезоэлектрические модули, связанные с ним. Единицей d в СИ является кулон на ньютон (Кл/Н). Вследствие анизотропии пьезоэлектрические модули d в зависимости от вида, направления деформации и направления поляризации для каждого минерала-пьезоэлектрика изменяются более чем на порядок. Максимальные пьезоэлектрические модули у кварца ($5 \cdot 10^{-4} - 20 \cdot 10^{-4}$ Кл/Н), у

турмалина ($3 \cdot 10^{-4}$ - $30 \cdot 10^{-4}$ Кл/Н), у нефелина ($4 \cdot 10^{-4}$ - $12 \cdot 10^{-4}$ Кл/Н), у канкринита ($6 \cdot 10^{-4}$ - $81 \cdot 10^{-4}$ Кл/Н). У большинства минералов d не превышает 10^{-5} Кл/Н.

Пьезоэлектрические модули скальных горных пород зависят не только от наличия и процентного содержания в породе минералов-пьезоэлектриков, но и от их определенной упорядоченности. Если кристаллы в породе ориентированы по направлению одного из элементов симметрии, то порода отличается повышенными значениями d . Кварцсодержащие породы, особенно если они содержат горный хрусталь, отличаются наибольшими пьезоэлектрическими модулями, хотя они в десятки раз меньше, чем модули монокристалла кварца. По мере убывания d от 10^{-3} до 10^{-7} Кл/Н эти породы можно расположить в следующем порядке: жильный кварц, кварцевые ядра пегматитовых жил, кварциты, граниты, гнейсы, песчаники. Объясняют это тем, что в изверженных породах в процессе их образования минералы более закономерно ориентируются относительно кристаллографических осей, в то время как в осадочных породах зерна кварца занимают беспорядочное положение. Нефелинсодержащие породы обладают значениями d от $3 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-5}$ Кл/Н. В породах, содержащих другие минералы-пьезоэлектрики, $d < 10^{-6}$ Кл/Н. Пьезоэлектрические модули горных пород с минералами-пьезоэлектриками определяются не только содержанием этих минералов и их пространственным положением, но и генезисом пород, их диэлектрической проницаемостью и упругими свойствами.

Пьезоэлектрические модули рыхлых влагосодержащих пород определяются их минеральным составом, структурой и текстурой, а в основном — пористостью, влажностью, составом и концентрацией растворенных в воде солей. С увеличением пористости и связанной влаги d возрастает, а с увеличением содержания свободной влаги d либо мало изменяется, либо уменьшается. Кроме перечисленных геолого-гидрогеологических факторов, d зависит от электрических и упругих свойств этих пород. В целом пьезоэлектрические модули влагосодержащих пород изменяются от 10^{-7} до 10^{-11} Кл/Н.

Диэлектрическая и магнитная проницаемости. Относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon_{II} / \varepsilon_0$ (где ε_{II} , ε_0 — диэлектрические проницаемости породы и воздуха) показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора, если вместо воздуха в него поместить данную породу. Значение ε изменяется от нескольких единиц (у сухих осадочных пород) до 80 (у воды) и зависит в основном от содержания воды и минерального состава породы. У изверженных пород ε изменяется от 5 до 12, у осадочных — от 2—3 (у сухих) до 16—40 (у полностью насыщенных водой). Диэлектрическая проницаемость играет значительную роль в высокочастотной электроразведке. Как отмечалось выше (см. п. 4.1), магнитная проницаемость громадного большинства пород примерно равна магнитной проницаемости воздуха. Лишь у ферромагнетиков относительная магнитная проницаемость может достигать 10, поэтому параметр μ используют при их разведке.

Тепловые и оптические свойства. К тепловым свойствам горных пород относятся теплопроводность λ_T , теплоемкость C , температуропроводность a , плотность σ , тепловая инерция $Q = \sqrt{\lambda_T C \sigma}$, а к оптическим — альбедо A , коэффициент яркости λ_A , степень черноты ε_λ и др. Поскольку на этих свойствах базируются сверхвысокочастотные дистанционные электромагнитные съемки, близкие по своей сути к терморазведке, то они рассмотрены в гл. 6.

4.1.2 Электромагнитные поля, изучаемые в электроразведке

Естественные переменные электромагнитные поля. К естественным переменным электромагнитным полям относят региональные переменные квазигармонические

низкочастотные поля космической (их называют магнитотеллурическими) и атмосферной природы.

1. Происхождение магнитотеллурических полей объясняют воздействием на ионосферу Земли потока заряженных частиц, посылаемых Солнцем. Вариации магнитотеллурического поля, тесно связанные с вариациями магнитного поля Земли, происходят одновременно и зависят от одной причины — корпускулярного излучения Солнца. Периодические одиннадцатилетние, годовые, суточные вариации магнитного поля Земли и магнитные бури вызывают соответствующие изменения магнитотеллурического поля. В целом эти поля инфранизкой частоты (от 10^{-5} до 10 Гц), а на таких частотах скин-эффект проявляется слабо. Поэтому магнитотеллурические поля проникают в Землю до глубин в десятки и даже первые сотни километров.

Магнитотеллурическое поле состоит из электрической компоненты E , которая связана с теллурическими (земными) токами, и магнитной компоненты H , связанной с вариациями магнитного поля. Если к двум заземленным на расстоянии в несколько десятков или сотен метров электродам MN подключить через усилитель электроразведочный осциллограф или магнитофон и автоматически записать изменение естественных потенциалов, то можно получить теллуриграмму E . Магнитную компоненту H измеряют с помощью чувствительного магнитометра. Зависимость магнитотеллурического поля от времени различная. Бывают периодические колебания с периодом T от долей секунды до нескольких минут, когда возмущения устойчивы. Такие колебания называют короткопериодными (КПК). Они наиболее интенсивны в утренние и дневные часы, в летние периоды и в годы повышенной солнечной радиации. Иногда записи носят импульсный характер (колебания-цуги), иногда вообще длительное время (несколько часов) сигналов E и H нет («теллурики» отсутствуют).

Измеряемыми параметрами магнитотеллурического поля являются электрические (E_x, E_y) и магнитные (H_x, H_y, H_z) составляющие напряженности поля. Значения параметров зависят, с одной стороны, от интенсивности вариаций теллурического и геомагнитного полей, а с другой — от удельного электрического сопротивления пород, слагающих геоэлектрический разрез. По измеренным взаимно перпендикулярным электрическим и магнитным составляющим можно рассчитать сопротивление ρ однородного полупространства (нормальное поле) с помощью полученной в теории электроразведки формулы:

$$\rho = \alpha T \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (4.2)$$

где T — период колебаний; α — коэффициент пропорциональности; $\alpha = 0,2$, если T измеряют в секундах, E_x — в милливольтках на километр (мВ/км), H_y — в нанотеслах (нТ).

Таким образом, измеряемыми параметрами магнитотеллурического поля являются электрические и магнитные компоненты поля и период их колебаний, а также получаемые по ним значения удельных электрических сопротивлений, которые над неоднородной средой называются кажущимися ρ_T . Эти поля изучают магнитотеллурическими методами (МТМ) электроразведки.

Поля грозовой природы. Происхождение естественных переменных полей атмосферной природы связано с грозовой активностью. При каждом ударе молнии в Землю (их число по всей поверхности Земли примерно составляет 100 в 1 с) возбуждается электромагнитный импульс («атмосферик»). Молнии наиболее распространены в тропических зонах, однако летом они часты даже в полярных широтах. В целом под воздействием гроз в Земле везде и всегда существует слабое грозное поле, которое назы-

вают шумовым. Оно состоит из периодически повторяющихся импульсов (цугов), которые носят квазисинусоидальный характер с преобладающими частотами от 10 Гц до 10 кГц и напряженностью по электрической составляющей до долей милливольт на метр.

Средний уровень поля «атмосфериков» подвержен заметным суточным и сезонным вариациям, т.е. векторы напряженности электрической E и магнитной H составляющих не остаются постоянными по амплитуде и направлению. Однако средний уровень напряженности E_{cp} , H_{cp} по какому-то направлению за время в течение 10 с зависит от усредненного электрического сопротивления геологической среды, над которой ведут наблюдения. Таким образом, измеряемыми параметрами «атмосфериков» являются различные составляющие E_{cp} и H_{cp} , используемые в методах переменного естественного электрического и магнитного поля (ПЕЭП и ПЕМП).

Геоэлектрохимические поля. К геоэлектрохимическим (физико-химическим) относятся естественные электрические, вызванные потенциалы, а также потенциалы электрохимических реакций рудных минералов.

1. К естественным постоянным электрическим полям относятся локальные поля электрохимической и электрокинетической природы. Электрохимическими являются постоянные поля, которые обусловлены окислительно-восстановительными реакциями, протекающими на границе электронного (рудные минералы) и ионного (окружающие подземные воды) проводников. Они наблюдаются на многих сульфидных, угольных и графитовых месторождениях. Возникновение естественных (ЕП) или самопроизвольных (ПС) потенциалов над сульфидными рудами можно объяснить следующим образом.

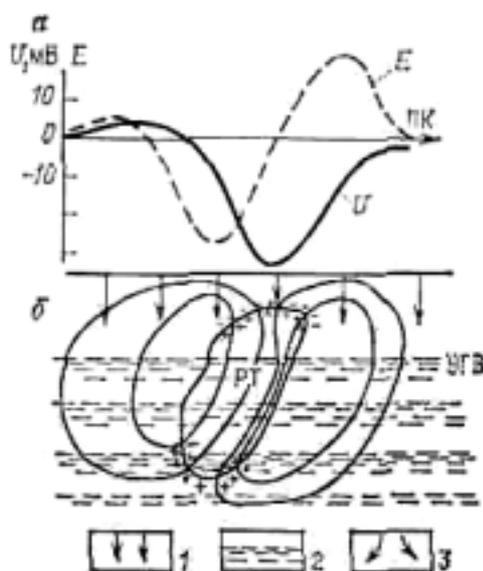


Рис.4.1 Графики потенциала U и напряженности поля E (а) и схема образования естественного поля сульфидной залежи (б):

1 — зона вадозной циркуляции подземных вод; 2 — зона насыщения; 3 — токовые линии; УГВ — уровень грунтовых вод; РТ — рудное тело

Верхняя часть сульфидной залежи, как правило, располагается в зоне активной, так называемой вадозной циркуляции богатых кислородом и углекислотой инфильтрующихся атмосферных вод (рис.4.1). Более глубокие части залежи находятся в зоне бедных кислородом застойных вод. Поэтому в верхней части залежи происходит окисление руды и переход сульфидов в сульфаты. Окислительные реакции сопровождаются освобождением электронов в атомах окисляющихся элементов, в результате чего верхняя часть рудного тела приобретает положительный потенциал по отношению к нижней. Восстановительные реакции в нижней части тела сопровождаются присоединением электронов, поэтому эта часть тела заряжается отрицательно. В окружающей среде происходит обратное распределение зарядов и возникает электрический ток. При этом к верхней части залежи будут направляться отрицательно заряженные ионы, а к нижней — положительные. Поэтому над верхней частью сульфидной залежи наблюдаются отрицательные аномалии потенциалов ЕП. Подобный процесс регенерации электрического поля происходит длительное время до полного окисления руд или изменения геолого-гидрогеологической обстановки.

Электрокинетические естественные постоянные поля обусловлены диффузионно-адсорбционными и фильтрационными свойствами горных пород, насыщенных подземными водами. Благодаря различной подвижности катионов и анионов происходит неравномерное распределение зарядов в подземных водах разной концентрации, что и ведет к созданию естественного электрического поля диффузионной природы. Величина и знак диффузионных потенциалов зависят от адсорбционных свойств минералов, т.е. способности мелкодисперсных и коллоидных частиц удерживать на своей поверхности ионы того или иного знака. Поэтому разности потенциалов, возникающие при диффузии в породах подземных вод разной концентрации, получили название диффузионно-адсорбционных.

Естественные потенциалы наблюдаются при фильтрации подземных вод через пористые породы. Трещины и поры в горной породе можно рассматривать как капилляры, стенки которых способны адсорбировать ионы одного знака (чаще всего отрицательные). В жидкой среде вблизи стенок капилляра накапливаются заряды противоположного знака. Таким образом, в капиллярах образуется двойной электрический слой. При движении жидкости через капилляр часть подвижных зарядов двойного электрического слоя (как правило, положительных) выносятся по направлению движения. В результате на концах капилляра возникает разность потенциалов, пропорциональная перепаду давлений. Движение подземных вод через сложную систему пор и трещин в горной породе создает некоторое суммарное электрическое поле фильтрации, зависящее от литологического состава, пористости и гидрогеологических факторов.

Основными измеряемыми параметрами естественных полей являются потенциалы U , разности потенциалов ΔU , напряженности поля $E = \Delta U / MN$, пропорциональные электрокинетической активности α . Естественные постоянные электрические поля разной природы используют в методе ЕП или ПС.

2. Поля вызванной поляризации или вызванные потенциалы (ВП) создают при гальваническом возбуждении постоянного тока с помощью линии AB и измерения разности потенциалов ВП на приемных электродах MN $\Delta U_{ВП}$ через 0,5—1 с после отключения тока, т.е. измеряют спад напряженности электрического поля. В результате по формуле (4.1) рассчитывают вызванную поляризуемость горных пород η . Над неоднородным полупространством рассчитанные по формуле (4.1) значения называют кажущейся поляризуемостью η_k .

Интенсивные поля ВП ($\eta = 10—40\%$) возникают в средах, содержащих электронно-проводящие (рудные) минералы. При пропускании тока через такую среду в ней происходят процессы, сходные с теми, которые наблюдаются при зарядке аккумулятора. Во время пропускания тока на поверхности рудных минералов, окруженных подземной водой, происходит ряд физических превращений и химических реакций, приводящих к вынужденной поляризации среды. После отключения тока в среде устанавливается равновесие и в течение нескольких секунд наблюдается спад электрического поля на приемных электродах. В средах, где породобразующие минералы не проводят электрический ток, образование полей ВП связано с перераспределением зарядов на контакте жидкой и твердой фаз, диффузией ионов через пористые среды, адсорбцией их на глинистых частицах и другими процессами. Поля вызванной поляризации используют в методе вызванных потенциалов (ВП).

3. Потенциалами реакций рудных минералов называют значения контактных разностей потенциала, которые наблюдаются при подключении к рудным минералам (рудам) источников постоянного тока. Под действием тока на границе минералов с металлической связью атомов и жидкости с ионной проводимостью протекают электродные окислительно-восстановительные реакции. Если к рудному телу подключить отрицательный полюс внешнего источника тока, то в среде идут катодные восстановительные

реакции с присоединением электронов к реагирующим рудным минералам. Этот процесс, например, на сульфидах приводит к их катодному разложению. Если к рудному телу подключить положительный полюс внешнего источника тока, то в среде идут анодные окислительные реакции, сопровождающиеся отрывом электронов от реагирующих минералов. В результате происходит растворение, разрушение минералов с образованием оксидов металлов. На сульфидах, например, происходит анодное растворение.

Каждый минерал имеет свои потенциалы реакций анодного растворения и катодного разложения. Они связаны с энергией кристаллической решетки, не зависят от генезиса и внешних условий и поэтому являются четким диагностическим признаком минерала. Например, для галенита характерны потенциалы реакций 0,36 В и - 0,87 В, для халькопирита - 1,17 В и - 0,63 В. Потенциалы реакций используют в контактном и бесконтактном способах поляризационных кривых (КСПК и БСПК), а также в методе частичного извлечения металлов (ЧИМ).

Искусственные постоянные электрические поля. Искусственные постоянные электрические поля создают с помощью батарей, аккумуляторов, генераторов, подключаемых к электродам-заземлителям (A, B), через которые в Землю пропускают ток I . С помощью двух других электродов-заземлителей (M, N) и милливольтметра измеряют разность потенциалов ΔU .

1. Поле точечного источника. Нормальное поле точечного источника (рис. 4.2), т.е. зависимость ΔU от I , расстояний между пунктами возбуждения и измерения, удельного электрического сопротивления однородного полупространства ρ , может быть определено с помощью закона Ома:

$$\Delta U = IR = I \rho \Delta l / s ,$$

где R — сопротивление линейного проводника; $\Delta l, s$ — его длина и площадь поперечного сечения.

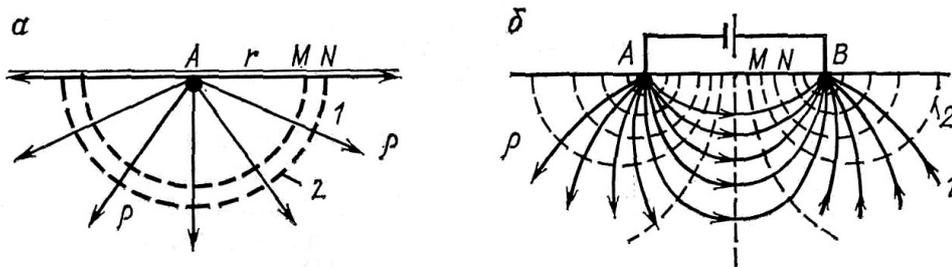


Рис.4.2 Поле точечного (а) и двух точечных (б) источников над однородной изотропной средой на границе земля — воздух.

1—токовые линии; 2 — эквипотенциальные линии

В однородной среде ток I от точечного источника стекает во все стороны равномерно. Эквипотенциальные поверхности, т.е. поверхности, на которых электрический потенциал U постоянен, должны быть перпендикулярны к токовым линиям, а значит, иметь вид полусфер с центром в точке A . Разность потенциалов ΔU между двумя точками M и N или между эквипотенциальными поверхностями с радиусами AM и AN , проходящими через эти две точки, может быть определена по приведенной выше формуле

$$\Delta U = \rho I \Delta l / s ,$$

где I — весь ток, проходящий через указанные полусферы.

Длина «проводника» равна расстоянию между соседними эквипотенциальными поверхностями $\Delta l = MN$, а поперечное сечение s — поверхности полусферы с радиусом AO , т.е. $s = 2\pi (AO)^2$. При больших AM и AN по сравнению с MN

$$(AO)^2 \approx AM \cdot AN, \quad \Delta U = \rho \cdot l \frac{MN}{2\pi \cdot AM \cdot AN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right) \quad (4.3)$$

Полученная формула дает возможность определить разность потенциалов, если известны ток, удельное сопротивление породы и расстояния между точками наблюдения и источником. И наоборот, измерив ΔU и I и определив расстояния между электродами, можно рассчитать удельное электрическое сопротивление горных пород.

При $AN \rightarrow \infty$ получаем формулу для расчета потенциала точечного источника U , т.е. разность потенциалов между точкой измерения и бесконечностью (при $AM=r$)

$$U = I\rho / 2\pi r$$

В теории электроразведки доказано, что электрод любой формы можно рассматривать как точечный, если его поле изучают на расстояниях, в 5 раз и более превышающих длину заземленной части электрода. Поэтому получаемые формулы расчета для точечного источника применимы в практической электроразведке.

2. Установки для измерения сопротивлений. Нормальные поля постоянных электрических токов могут изучаться с помощью разных установок, т.е. разных комбинаций питающих (AB) и приемных (MN) электродов. Для двухэлектродной установки AM ($B \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty$)

$$\rho = 2\pi \cdot AM \cdot \frac{U}{I}.$$

Для трехэлектродной установки удельное электрическое сопротивление можно рассчитать по формуле

$$\rho = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (4.4)$$

В практике электроразведки часто применяют четырехэлектродные установки $AMNB$ (рис.4.2, б). К одному питающему электроду (например, A) подключают положительный полюс источника тока, к другому (B) — отрицательный. Разность потенциалов на приемных электродах (MN) от электрода A определяют по полученной выше формуле (4.3). Аналогичным образом из формулы (4.2) можно получить разность потенциалов от отрицательного полюса B , если заменить A на B , а I на $-I$. Разность потенциалов от обоих электродов AB равна сумме ΔU_A и ΔU_B , т.е.

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

Если MN установить так, чтобы $AM=BN$, а $AN=BM$, то получим формулу для расчета ρ симметричной четырехэлектродной установкой:

$$\rho = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta U}{I}. \quad (4.4')$$

В методах сопротивлений применяют и ряд других установок. Например, для глубинных исследований используют различные дипольные установки (рис.4.3). Если приемный диполь $M_a N_a$ перпендикулярен к радиусу между его центром и центром питающего диполя r , а угол между радиусом и питающей линией AB (θ) определяется неравенством $70^\circ < \theta < 110^\circ$, то такую установку называют азимутальной. Частным случа-

ем азимутальной ($\theta = 90^\circ$) является экваториальная установка ($M_\varepsilon N_\varepsilon$). Если приемный диполь ($M_p N_p$) направлен вдоль r , а $-30^\circ < \theta < 30^\circ$, то такую установку называют радиальной. Частным случаем радиальной установки ($\theta = 0^\circ$) является осевая ($M_o N_o$).

Для каждой установки имеется своя формула, по которой рассчитывают коэффициент установки. Для азимутальной установки $k = \frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN} \cdot q$, для радиальной $k = \frac{2\pi r^3}{AB \cdot MN} \cdot p$, где p, q — коэффициенты, мало отличающиеся от единицы и определяемые по специальным номограммам. Таким образом, при работах любой установкой ρ рассчитывают по формуле

$$\rho = k \cdot \frac{\Delta U}{I}, \quad (4.5)$$

где ΔU — напряжение на MN ; I — ток в линии AB ; k — коэффициент установки, зависящий лишь от расстояний между электродами.

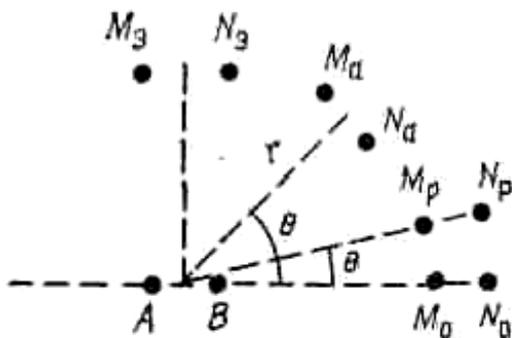


Рис.4.3 Схема различных дипольных установок

3. Кажущееся сопротивление. Формула (4.5) позволяет определить сопротивление пород, если среда однородна. Однако по этой же формуле можно рассчитать некоторую условную величину, если замеры вести над неоднородной в электрическом отношении средой (что практически всегда и бывает при электроразведке). Эту величину называют кажущимся сопротивлением ρ_k .

Рассмотрим физический смысл величины ρ_k . Возьмем простейшую трехэлектродную установку AMN с очень малым MN (градиентная установка). Используя формулу для расчета ρ_k [см. выражение (4.3)] и заменив $AM \cdot AN \approx \{AO\}^2$, можно записать

$$\rho_k \approx \frac{\Delta U}{MN} \cdot \frac{2\pi(AO)^2}{I} \quad (4.6)$$

Из теории поля известно, что напряженность электрического поля $E = j_{MN} \rho_{MN}$, где j_{MN} — плотность тока; ρ_{MN} — удельное сопротивление вблизи приемных электродов. В то же время $E = AU/MN$. Обозначая $j_o = I/2\pi(AO)^2$ и с учетом того, что на постоянных разносах и при однородном верхнем слое $\rho_{MN} / j_o = const$, получаем

$$\rho_k = j_{MN} \cdot \frac{\rho_{MN}}{j_o}, \quad (4.7)$$

т.е. кажущееся сопротивление пропорционально плотности тока у приемных электродов. Полученная формула позволяет выяснить физический смысл кажущегося сопротивления и облегчает понимание характера изменения ρ_k над различными геоэлектрическими разрезами. Искусственные постоянные электрические поля используют в методах сопротивлений.

Искусственные переменные гармонические электромагнитные поля создают с помощью разного рода генераторов синусоидального напряжения звуковой и радиоволновой частоты, подключаемых к гальваническим заземлителям или индуктивным незаземленным контурам. С помощью других заземленных приемных линий или неза-

земленных контуров измеряют электрические E или магнитные H составляющие напряженности поля. Напряженности искусственных переменных гармонических электромагнитных полей определяются, прежде всего, удельным электрическим сопротивлением среды. С одной стороны, чем выше сопротивление, тем меньше скин-эффект и больше глубина проникновения поля. С другой — чем ниже сопротивление, тем больше интенсивность вторичных вихревых электромагнитных полей, индуцированных в среде.

Вывод аналитических формул, связывающих между собой измеряемые параметры E , H , ток в датчике поля I , расстояние между генераторными и измерительными линиями r и электромагнитные свойства однородного полупространства, очень сложен. На низких частотах ($f < 10$ кГц) расчет сопротивления однородного полупространства ведут по формуле

$$\rho = k_{\omega} \frac{\Delta U(\omega)}{I}, \quad (4.8)$$

где k_{ω} — коэффициент установки, разный для различных способов создания и измерения поля, расстояний между источником и приемником, круговых частот ($\omega = 2\pi f$); $\Delta U(\omega)$ — разность потенциалов, пропорциональная составляющим E или H . Над неоднородной средой по этой же формуле рассчитывают кажущееся сопротивление ρ_{ω} .

Низкочастотные гармонические поля используют в индукционных зондированиях и профилированиях. На высоких частотах ($f > 10$ кГц) формулы для параметров нормального поля более громоздки, так как они зависят от трех электромагнитных свойств среды: ρ , ϵ , μ . Эти поля применяют в различных радиоволновых и радиолокационных методах электроразведки.

Искусственные импульсные (неустановившиеся) электромагнитные поля создают с помощью генераторов, дающих на выходе напряжение в виде прямоугольных импульсов разной длительности или импульсов ступенчатой формы и подключаемых к заземленным линиям или незаземленным контурам. В момент резкого включения или выключения тока в проводящей геологической среде индуцируются вихревые вторичные электромагнитные поля. Из теории спектров и импульсной техники известно, что при резком изменении поля в среде возникает сигнал, который можно разложить в набор гармонических колебаний широкого спектра частот. Чем острее импульс или крутизна спада сигнала, тем более высокочастотные колебания содержатся в нем, а с увеличением частоты растет скин-эффект и уменьшается глубина проникновения поля. Однако с ростом частоты увеличиваются вторичные вихревые индукционные поля.

В зависимости от формы импульса питающего тока и сопротивления среды сигналы искажаются. Определяя с помощью приемной линии MN или незаземленного контура (петли, рамки) разности потенциалов $\Delta U_E(t)$ и $\Delta U_H(t)$ на разных временах t после окончания питающего сигнала, изучают так называемые переходные процессы или становление (установление) поля в среде.

Вывод аналитических формул, связывающих между собой измеренные разности потенциалов $\Delta U_E(t)$, $\Delta U_H(t)$, ток в питающей цепи I , сопротивление однородного полупространства ρ_{τ} и расстояние r между центрами питающего и приемного устройств, очень сложен. Формулы для расчета сопротивления однородного полупространства для дальней ($r > 5H$) и ближней ($r < H$) зон от источника (где H — проектируемые глубины разведки) имеют вид

$$\rho_{\tau_0} = k_0 \cdot \Delta U(t) / I, \quad \rho_{\tau_0} = k_0 \cdot [I / \Delta U(t)]^{2/3} \cdot t^{-5/3}, \quad (4.9)$$

где k_0 , k_0 — коэффициенты установок, зависящие от типа питающей и приемной линий, их размеров и разноса r . Для неоднородной среды сопротивления, рассчитанные по этим формулам, называются кажущимися ($\rho_{\tau 0}$, $\rho_{\tau 0}$). Неустановившиеся поля используют в зондированиях становлением поля (ЗС) и методе переходных процессов (МПП).

Инфракрасное излучение земной поверхности. Инфракрасное излучение связано с пассивным электромагнитным излучением земной поверхности в диапазоне длин волн 0,7—400 мкм. Его интенсивность определяется тепловыми потоками от внутренних источников тепла Земли, внешним нагревом за счет солнечной активности, тепловыми и отражательными свойствами горных пород и другими факторами. Инфракрасное излучение изучают при сверхвысокочастотном электромагнитном профилировании, находящемся на стыке электроразведки и терморазведки (см. гл. 6).

Пьезоэлектрические явления. Пьезоэлектрические явления связаны с электрическими полями, которые наблюдаются над геологическими средами и породами с повышенными пьезоэлектрическими модулями, если к ним приложить механические напряжения. Подобные поля в кристаллических породах обусловлены пьезоэлектрическим эффектом (ПЭЭФ), т.е. электрической поляризацией зарядов в кристаллах диэлектриков при механическом воздействии на них.

В осадочных породах пьезоэлектрические модули минералов могут быть невысокими, а наблюдаемое при механическом воздействии электрическое поле получило название сейсмоэлектрического эффекта (СЭЭФ). Природа СЭЭФ связана с электрокинетическими процессами во влагосодержащих породах при прохождении по ним упругих волн. Возникающие при этом электрические потенциалы примерно такого же происхождения, как и рассмотренные выше естественные потенциалы фильтрации. И в том, и в другом случае при изменении давления на концах капилляра происходит смещение двойных электрических слоев в них, и в результате возникают разности электрических потенциалов. На изучении ПЭЭФ и СЭЭФ основаны пьезоэлектрические методы разведки.

4.2 Аппаратура и оборудование для электроразведки

Для многочисленных методов электроразведки можно применять различную аппаратуру и оборудование. Некоторые приборы используют для работ одним, другие — несколькими методами.

4.2.1 Общая характеристика генераторно-измерительных устройств

В комплект техники для электроразведки обычно входят следующие блоки.

1. Машинные генераторы, батареи, аккумуляторы (в методах естественного поля они не нужны) для непосредственного питания генераторных устройств постоянным током либо для преобразования его в напряжение нужной частоты. Машинные генераторы работают от двигателя автомобиля или бензоэлектрических агрегатов. Для электроразведки используют батареи типа 69-ГРМЦ-6 (Б-72) или 29-ГРМЦ-13 (Б-30) с напряжением 70 или 30 В и массой 25 или 20 кг. Они представляют собой наборы сухих марганцево-цинковых элементов. Можно использовать и любые другие серийные батареи с напряжением 30—100 В. Кроме того, для электроразведки иногда применяют разного рода аккумуляторы. Постоянное напряжение источников питания в разных методах можно изменять от 10 до 1000 В.

2. Измерители, или регистраторы тока, в питающих линиях. В разных методах ток изменяется от 0,01 до 50 А.

3. Измерительные, или регистрирующие приборы, предназначенные для определения амплитудных и фазовых значений (абсолютных или относительных) напряжен-

ности поля. Часто измеряют разности потенциалов ΔU в приемных линиях с помощью стрелочных милливольтметров. Регистрацию осуществляют посредством разного рода оптических осциллографов и цифровых регистраторов. Регистрацию называют аналоговой, когда запись ведут в видимой форме, или цифровой, когда сигналы кодируют в двоичном цифровом коде и записывают на магнитофон. Измерительные и регистрирующие приборы для электроразведки обычно характеризуются следующими техническими характеристиками: различными частотами и динамическими диапазонами; пороговой чувствительностью (около 10 мкВ) и погрешностью (в пределах ± 3 —10 %); высоким входным сопротивлением (свыше 1 МОм); помехозащищенностью, особенно от помех промышленной частоты 50 Гц; возможностью ручной или автоматической установки нуля прибора, обычно предназначенной для компенсации электродных разностей потенциалов; отсутствием или наличием микропроцессоров, обеспечивающих измерение и обработку информации; элементной базой приборов (транзисторных и интегральных блоков); способами и источниками питания электронных схем и т. п.

4. Электроды-заземлители для гальванического создания поля в Земле и измерения электрических составляющих напряженности поля. В качестве электродов для питающих линий AB используют стальные, а для приемных линий MN медные или латунные электроды длиной 0,3—1 м и диаметром 1—3 см. В поляризационных методах применяют неполяризующиеся электроды, которые состоят из заземляемого пористого (керамического или брезентового) сосуда с раствором медного купороса и медного стержня в нем.

5. Незаземленные контуры — петли (с размером стороны до 1 км), рамки (диаметром до 1 м), которые служат для индуктивного возбуждения поля и измерения магнитных составляющих поля. Петли и рамки изготавливают из изолированного провода, число витков и диаметр которых зависят от частоты поля и метода разведки.

6. Провода невысокого сопротивления, большой механической прочности, с хорошей изоляцией. Для электроразведки используют специальные геофизические полевые медные и сталемедные провода (ГПМП, ГПСМП и др.).

7. Вспомогательное оборудование (катушки, кувалды, инструмент и др.).

Для электроразведки изготавливают множество типов аппаратуры, характеризующейся разнообразием схемных решений и конструкций в зависимости от глубин разведки и места проведения работ, частоты поля и измеряемых параметров. По глубинности разведки и геологическому назначению аппаратуру для электроразведки можно разделить на три группы: а) переносную; б) электроразведочные станции; в) аэроэлектроразведочные станции.

4.2.2 Переносная аппаратура

При электроразведке на небольших глубинах (до 500 м) с поверхности Земли и в горных выработках используют различного рода переносную аппаратуру и оборудование, состоящие из ряда блоков общей массой 20—100 кг. Рассмотрим некоторые серийные отечественные приборы, предназначенные для разведки на постоянном и низкочастотном переменном токе (АЭ-72, АНЧ-3), для индуктивного электромагнитного профилирования гармоническими (ЭПП) и неустановившимися (МПП) полями, для высокочастотной электроразведки (СДВР, ДЭМП, РП).

Электронный стрелочный компенсатор. Электронный стрелочный компенсатор, или автокомпенсатор электроразведочный (АЭ-72), предназначен для электроразведки постоянным током методами естественных постоянных электрических полей (ЕП), сопротивлений (ВЭЗ, ЭП), заряда (МЗ). Прибор АЭ-72 является транзисторным милливольтметром, построенным по автокомпенсационной схеме или по схеме усили-

теля с глубокой отрицательной обратной связью. Этот прибор массой 4 кг, помимо измерения ΔU , служит для компенсации электродных потенциалов и измерения I .

Аппаратура низкой частоты. Аппаратура низкой частоты (АНЧ-3) предназначена для электроразведки методами естественных переменных электрических полей, сопротивлений, заряда. В комплект АНЧ-3 входят генератор переменного напряжения частотой 5 Гц и массой около 3 кг, в котором постоянное напряжение батарей типа Б-70, Б-30 преобразуется в переменное, и транзисторный милливольтметр массой около 4 кг, построенный по автокомпенсационной схеме с высокой помехозащищенностью от полей промышленной частоты.

Аппаратура для измерения осей эллипса поляризации магнитного поля. Аппаратура для измерения осей эллипса поляризации (ЭПП-2) предназначена для индуктивного низкочастотного профилирования. С ее помощью в Земле создают гармоническое поле и определяют большую, связанную с первичным полем, и малую, обусловленную вторичным (индукционным) полем, оси эллипса поляризации измеряемого вектора магнитного поля. Прибор ЭПП-2 состоит из генератора синусоидального напряжения частотой 78, 312, 1250, 5000, 20000 Гц и измерительного блока, предназначенного для определения разности потенциалов, пропорциональных осям эллипса поляризации суммарного магнитного поля, с помощью двух жестко скрепленных взаимно перпендикулярных рамок. Общая масса комплекта примерно 50 кг.

Аппаратура для измерения переходных процессов. Аппаратура индуктивного профилирования методом переходных процессов (МПП) служит для коммутации постоянного тока батарей в прямоугольные импульсы длительностью 20—50 мс, подаваемые в незаземленный контур, и измерения в том же или другом контуре разности потенциалов на временах от 1 до 50 мс после окончания импульса. Аппаратура для МПП состоит из транзисторного коммутатора и электронного измерительного блока, в котором осуществляются стробирование импульсов, накопление и измерение амплитуд сигналов на разных временах. Масса различных модификаций аппаратуры МПП составляет 10—40 кг.

Аппаратура для радиокомпарационного профилирования. Для радиокомпарационного (радиоэлектромагнитного) профилирования путем изучения сверхдлинноволновых полей радиостанций используют радиоприемник типа СДВР-3. Он представляет собой транзисторный радиоприемник-компаратор, работающий в диапазоне 10—30 кГц и предназначенный для измерения горизонтальных и вертикальных составляющих напряженности электрического и магнитного полей. От обычных радиоприемников СДВР-3 отличает наличие вращающейся ферритовой антенны, устройства для оценки цены деления шкалы прибора (компаратора) и стрелочного индикатора. Масса прибора около 5 кг.

Аппаратура для дипольного электромагнитного профилирования. Для дипольного электромагнитного высокочастотного профилирования искусственными полями служит аппаратура типа ДЭМП. Она состоит из портативного генератора с рабочими частотами 2,8; 32; 128 кГц, радиоприемника и рамочных генераторных и измерительных антенн. Общая масса до 17 кг.

Аппаратура для радиопросвечиваний. Для радиоволновых просвечивании между скважинами и горными выработками существуют различные комплекты аппаратуры РП. Они состоят из передатчиков, приемников (частотой от 0,1 до 10 МГц) и наборов антенн такой формы, чтобы их можно было опускать в скважины или переносить по горным выработкам.

4.2.3 *Электроразведочные станции*

Для электромагнитных зондирований на больших глубинах (до 5 км), когда необходимо вводить большие токи, применяют электроразведочные станции различных марок. Обычно работы проводят электроразведочными станциями ЭРС-67, ЭРСУ-71, ВП-62, ЦЭС-2 и другими, смонтированными, как правило, на двух автомашинах (грузовых или легковых).

Генераторные группы. На одной автомашине электроразведочной станции, называемой генераторной группой, расположены один или два генератора постоянного тока напряжением до 500 В при токе до 25 А, которые можно включать последовательно или параллельно. Роторы генераторов вращаются от двигателя автомобиля через специальную коробку отбора мощности и дополнительный кардан. Выходное напряжение регулируют изменением числа оборотов коленчатого вала двигателя автомобиля. С помощью электромагнитных контакторов постоянный ток в станциях ЭРС-67 и ВП-62 непосредственно подают в питающую линию. В станциях ЭРСУ-71 и ЦЭС-2 постоянный ток с помощью тиристорного коммутатора, управляемого специальным транзисторным генератором, превращают в переменный в диапазоне 10^{-3} — 10^3 Гц. Он служит для зондирования на переменном токе. В генераторной группе установлены приборы для контроля, регулировки и измерения тока в питающей линии. Глубинные электромагнитные исследования иногда выполняют с помощью специальных МГД-генераторов.

Измерительные лаборатории. На автомашине, называемой измерительной, или полевой, лабораторией, расположена аппаратура, предназначенная для автоматической регистрации разностей потенциалов. Для этого в станциях ЭРС-67, ЭРСУ-71, ВП-62 стоят электроразведочные полевые осциллографы (ЭПО) для регистрации сигналов в аналоговой форме (на фотобумаге). В цифровой электроразведочной станции ЦЭС-2 сигналы регистрируют в цифровой форме с помощью специального магнитофона. Для этого в ней имеются электронные устройства для кодирования сигналов в цифровую форму в двоичной системе счисления. Цифровая запись результатов электроразведки позволяет обрабатывать материалы электроразведки с помощью обычных ЭВМ. Аналогичным образом устроена электроразведочная станция для морских электромагнитных зондирований.

4.2.4 *Аэроэлектроразведочные станции*

Аэроэлектроразведочные станции бывают трех типов. Один из них предназначен для электромагнитного низкочастотного профилирования с наземной питающей и воздушной приемной установками (АЭРО-ДК). Станция состоит из наземной генераторной группы, которая питает переменным током частотой 0,1—10 кГц либо длинный (до 30 км) кабель, либо большую (в поперечнике до 5 км) незаземленную петлю (НП), и воздушной измерительной лаборатории. С помощью рамочной антенны, расположенной вокруг фюзеляжа самолета или в выносной гондоле, измеряют напряженность магнитного поля и разность фаз между измеряемым в рамке напряжением и током в питающей кабеле. Для фазовых измерений в генераторной группе, питающей кабель, и на самолете установлены радиостанции, с помощью которых проводят передачу и прием фазы. Запись результатов автоматическая.

Второй тип аэроэлектроразведочных станций также односамолетный. В ней и генераторная, и измерительная установки расположены на одном самолете. Такие станции предназначены для радиокомпарационной съемки (СДВР), радиоэлектромагнитного профилирования (РЭМП), дипольного низкочастотного профилирования (ДИП-А), воздушной съемки переходных процессов (МПП-А). В двух последних станциях на самолете или вертолете монтируют генераторную установку и, так же как и в станции

СДВР (РЭМП), устанавливают регистрирующую аппаратуру. Вокруг самолета или вертолета закрепляют генераторную петлевую антенну, а измерительную антенну на кабеле длиной до 50 м помещают в выносной гондоле. В результате регистрируют те или иные составляющие магнитного поля.

Третий вариант аэроэлектроразведочных станций — двухсамолетный. На одном из них располагают генераторную установку с петлевой антенной, а на другом — регистрирующее устройство с приемной магнитной антенной.

4.3 Методы электроразведки

4.3.1 Электромагнитные зондирования

Общая характеристика. К электромагнитным зондированиям относят группу методов электроразведки, в которых аппаратура, методика и система наблюдений направлены на то, чтобы в каждой точке зондирования получить информацию об изменении электромагнитных свойств среды с глубиной. Для этого на изучаемом участке параметры используемого поля и установок изменяют таким образом, чтобы поле постепенно проникало на все большие глубины. Для увеличения глубинности электроразведки используют следующие приемы: дистанционный (геометрический), когда постепенно увеличивают расстояния r между питающими и приемными линиями, и частотно-временной, основанный на уменьшении скин-эффекта при увеличении периода гармонических (квазигармонических) колебаний или времени становления поля (переходных процессов).

Для зондирования применяют одно- и многоканальные приборы и электроразведочные станции постоянного или переменного тока разной частоты. Получаемые в результате зондирования те или иные наблюдаемые или расчетные параметры (чаще всего это кажущиеся сопротивления) для разных параметров глубинности характеризуют изменение геоэлектрического разреза с глубиной. В результате строят кривые зондирования, т.е. графики зависимостей кажущихся сопротивлений от параметров глубинности.

Современная теория и практика электромагнитных зондирования базируются на математическом моделировании прямых и обратных задач в основном для горизонтально-слоистых моделей, поэтому зондирования применяют при изучении горизонтально и полого залегающих (углы падения меньше $10\text{—}15^\circ$) сред. В результате количественной интерпретации кривых электромагнитных зондирования получают послойные, или обобщенные, геометрические и электрические свойства пород (см. п. 4.4). При этом послойные, или обобщенные, параметры можно определить достаточно точно, только если мощности слоев или толщ превышают их глубины залегания. По совокупности профильных или площадных зондирования строят геоэлектрические разрезы (по вертикали откладывают мощности слоев и проставляют значения электрических параметров) или карты тех или иных параметров этих разрезов.

Электромагнитные зондирования применяют для решения широкого круга задач, связанных с расчленением пологослоистых геологических разрезов с изменяющимися по глубине и от точки к точке электромагнитными свойствами. Основными из них являются: а) определение мощности и состава покровных и коренных отложений, глубины залегания фундамента, расчленение осадочных толщ, что очень важно для структурно-геологического объемного картирования; б) оценка геометрических параметров и физического состояния массива горных пород, представляющая большой интерес для инженерно-геологического, мерзлотно-гляциологического и гидрогеологического картирования; в) поиски пластовых, как правило, нерудных полезных ископаемых; г) изучение геосфер Земли и глубинной электропроводности.

Электрическое зондирование — это модификация метода сопротивлений на постоянном или низкочастотном (до 20 Гц) токе, в которой в процессе работы расстояние между питающими электродами или между питающими и приемными линиями (разнос) постепенно увеличивают, т.е. используют дистанционный (геометрический) принцип изменения глубинности. Чем больше разнос, тем больше глубина проникновения тока, а график зависимости кажущегося сопротивления от разноса или кривая зондирования характеризует изменение удельных электрических сопротивлений с глубиной. Поэтому в результате их интерпретации разрез расчленяют по вертикали.

Различают две модификации зондирования: вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), применяемые для разведки на небольших глубинах (до 300—500 м), и дипольные электрические зондирования (ДЭЗ), применяемые для разведки на глубинах 0,5—5 км.

Методика вертикальных электрических зондирований. Вертикальное электрическое зондирование выполняют чаще всего симметричной четырехэлектродной градиент-установкой с $MN < AB/3$

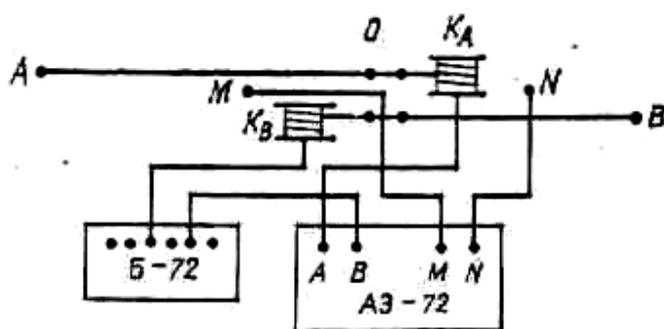


Рис.4.4 Схема установки вертикального электрического зондирования.

K_A, K_B — катушки с проводом; Б-72 — батарея; АЭ-72 — автокомпенсатор электроразведочный

установкой с $MN < AB/3$ (рис.4.4). Работы проводят следующим образом. В избранной для зондирования точке (центре зондирования) устанавливают электроразведочный прибор (АЭ-72), батарею, две катушки с проводом для разноса питающих электродов и на небольшом расстоянии (1—2 м) друг от друга заземляют два приемных электрода MN . Направление, по которому должны разниться питающие и приемные линии, выбирают исходя из геологических и топографических соображений.

Вдоль линии MN заземляют питающие электроды AB на расстоянии 1,5—3 м от центра и измеряют ток в питающей линии и напряжения на приемных электродах. Далее рассчитывают $\rho_k = k \cdot \Delta U / I$ [см. формулу (4.5)], где $k = 0,1 \pi \cdot AM \cdot AN / MN$ - коэффициент установки (множитель 0,1 взят потому, что ΔU с прибором АЭ-72 измеряют в милливольтгах, а I — в сантиамперах).

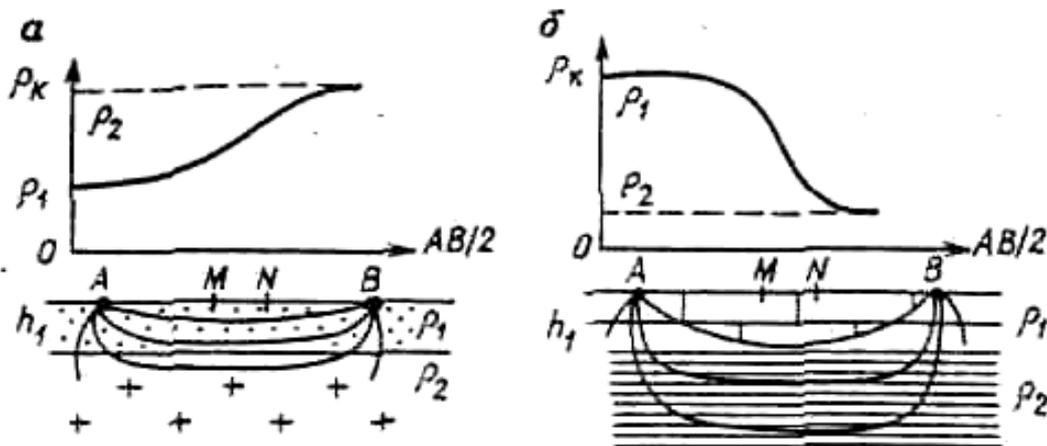


Рис. 4.5 Двухслойные кривые ВЭЗ с $\rho_1 < \rho_2$ (а) и с $\rho_1 > \rho_2$ (б)

Далее разности питающих электродов последовательно увеличивают (в геометрической прогрессии) и для каждого разности рассчитывают ρ_k . Длина $AB/2=r$ может быть, например, принята 1,5; 2,2; 3; 4,5; 5; 8; 10; 15; 22; 30; 45; 60; 80; 100 м и т. д. При этом, когда $AB/2$ изменяется от 1,5 до 10 м, $MN = 1$ м; при $AB/2$ от 15 до 100 м $MN = 10$ м; при $AB/2$ от 150 до 1000 м $MN = 100$ м. По результатам измерения ρ_k на специальном бланке с логарифмическим масштабом по осям координат (бланк ВЭЗ с модулем 6,25 см) строят кривую ВЭЗ: по вертикали откладывают ρ_k , а по горизонтали — величину полуразноса ($AB/2$) (рис. 4.5).

После окончания зондирования и построения кривой ВЭЗ аппаратуру и оборудование переносят на новую точку. Обычно точки зондирования располагают вдоль разведочных линий. Расстояния между соседними точками ВЭЗ изменяются от нескольких десятков до нескольких сотен метров и должны быть сравнимы с проектируемыми глубинами разведки. Максимальный разнос $AB/2$ выбирают в 3—10 раз больше этих глубин.

Физико-геологическое обоснование ВЭЗ. Рассмотрим несколько типичных разрезов и получаемых над ними кривых ВЭЗ, поясняющих физико-геологический смысл зондирования. Пусть имеется двухслойный разрез: сверху — наносы, внизу — граниты (рис.4.5, а). При малых радиусах ($AB < h_1$) $\rho_k \approx \rho_1$. С увеличением разности ток будет отжиматься плохо проводящими подстилающими породами к поверхности, поэтому возрастут его плотность и ρ_k [см. формулу (4.7)]. Очевидно, что на больших разностях ($AB > 10 h_1$) $\rho_k \rightarrow \rho_2$. В результате зондирования получают двухслойную кривую ВЭЗ для случая $\rho_1 < \rho_2$. Кроме такой восходящей, могут наблюдаться и нисходящие кривые ВЭЗ, если $\rho_1 > \rho_2$ (рис.4.5, б).

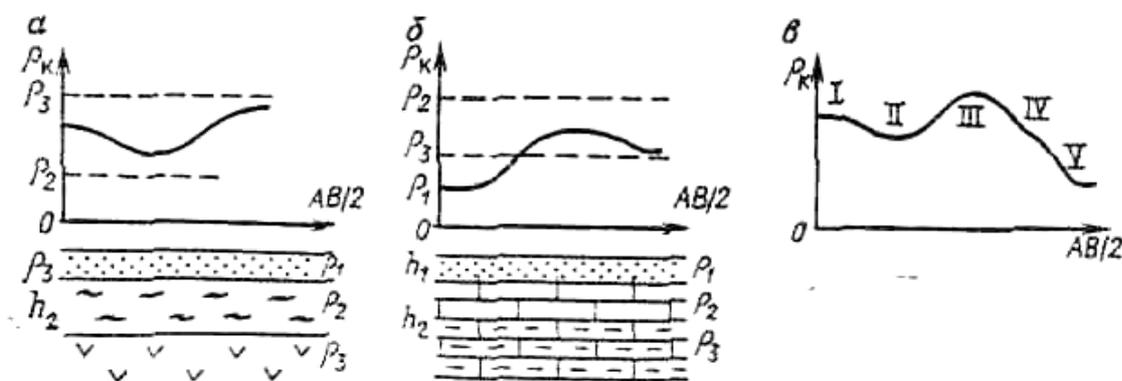


Рис.4.6 Многослойные кривые ВЭЗ: трехслойные типа Н (а) и типа К (б), пятислойная типа НКQ (в).

Рассмотрим трехслойный разрез, в котором сверху залегают пески, ниже — хорошо проводящие ток глины, а еще ниже — изверженные породы с высоким сопротивлением (рис.4.6, а). При малых разностях AB $\rho_k \rightarrow \rho_1$, с увеличением разности ток стремится войти во второй проводящий слой. Значит, вблизи MN уменьшаются плотность тока и ρ_k . При очень больших разностях ток будет проходить в основном в третьем слое, а при $AB/2 \rightarrow \infty$ $\rho_k \rightarrow \rho_3$. Трехслойные кривые, у которых $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$, называют кривыми типа Н.

Представим, что под наносами залегают мощная толща карбонатных пород — сухих в верхней части, обводненных в нижней (ниже уровня подземных вод). Очевидно, на полученной над таким разрезом кривой ρ_k будет максимум (рис.4.6, б). Подобные кривые называют кривыми типа К. Как видим, двухслойный геологический разрез по

данным электроразведки выявляется как трехслойный. Этот пример показывает, что далеко не всегда литологические слои соответствуют электрическим горизонтам. Если $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$, то кривую называют кривой типа А, если $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ — кривой типа Q.

На практике обычно получают многослойные кривые ВЭЗ. Они имеют буквенное обозначение, состоящее из типов тех трехслойных кривых, из которых состоит данная многослойная. Например, кривая, приведенная на рис.4.6, в,—пятислойная типа НКQ.

Дипольные электрические зондирования. Если надо изучить разрез на больших глубинах (несколько сотен метров), то разносы AB приходится увеличивать до 10 км. При таких разносах проводить ВЭЗ сложно. В этом случае предпочитают использовать дипольные установки (азимутальные, радиальные и др.). При дипольных электрических зондированиях (ДЭЗ) измеряют кажущееся сопротивление при разных расстояниях или разносах r между питающим и приемным диполями (см. рис.4.3). Электроды относят либо в одну сторону от неподвижного питающего диполя (одностороннее ДЭЗ), либо вначале в одну, а затем в противоположную сторону (двустороннее ДЭЗ).

Дипольное зондирование выполняют с помощью электроразведочных станций. Сначала проводят топографическую подготовку работ. В зависимости от условий передвижения электроразведочных станций ДЗ можно выполнять по криволинейным маршрутам, приуроченным к дорогам, рекам и участкам, к которым может быть доставлена полевая лаборатория. На рис.4.7 приведена схема увеличения разносов дипольного азимутального зондирования (ДАЗ). Величина R должна увеличиваться примерно в геометрической прогрессии (например, $R = 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 15; 20; 30$ км).

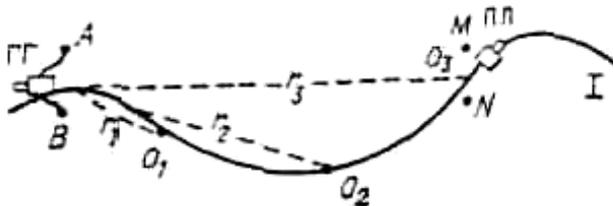


Рис.4.7 Схема проведения дипольного азимутального зондирования.

- ГГ — генераторная группа;
- ПЛ — полевая лаборатория;
- I — дорога

Измерив ток в линии AB I_1 и разность потенциалов на MN ΔU_1 , можно получить $\rho_k = k_1 \Delta U_1 / I_1$, где k_1 — коэффициент дипольной установки. После этого полевая лаборатория переезжает на новую точку O_2 . По радио устанавливают связь между станциями, снова измеряют ΔU , I и рассчитывают ρ_k .

В результате на бланках с двойным логарифмическим масштабом строят кривую ДЭЗ: по горизонтали откладывают r (в азимутальном

и экваториальном зондированиях) или $r/2$ (в радиальном или осевом зондировании), а по вертикали — ρ_k . Форма кривых ДЭЗ, их названия такие же, как и у кривых ВЭЗ.

При морских электрических зондированиях используют дипольные осевые установки, а сами зондирования проводят непрерывно (НДОЗ). В процессе выполнения НДОЗ приемная линия и регистрирующая аппаратура, установленные на приемном судне, остаются неподвижными. Питающая линия непрерывно перемещается на генераторном судне сначала в одну, а затем в другую сторону от приемной линии. После обработки автоматических записей токов и разностей потенциалов рассчитывают кажущиеся сопротивления для разных расстояний между питающей и приемной линиями и строят кривые ДЭЗ.

Зондирование методом вызванной поляризации. Вертикальное электрическое зондирование методом вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП) по методике работ и глубинности разведки мало чем отличается от рассмотренных выше ВЭЗ. Оно предназначено для расчленения разреза с разной поляризуемостью слоев. С помощью специальной одно- или многоканальной аппаратуры для метода ВП кроме параметров ΔU и I , изме-

ряемых, как и в методе ВЭЗ, определяют $\Delta U_{ВП}$ через 0,5 с после отключения тока в AB . В результате кроме $\rho_k = k \Delta U / I$ рассчитывают $\eta_k = (\Delta U_{ВП} / \Delta U) \cdot 100 \%$ - кажущуюся поляризуемость. Далее на бланках с логарифмическим масштабом по осям координат (бланках ВЭЗ) наряду с кривыми ВЭЗ строят кривые ВЭЗ-ВП: по горизонтали откладывают $AB/2$, по вертикали — η_k . При количественной интерпретации ВЭЗ-ВП расчленяют разрез, т.е. определяют мощности и поляризуемости слоев горизонтально-слоистого разреза.

Магнитотеллурические методы. К магнитотеллурическим методам (МТМ) относят ряд методов электроразведки, основанных на изучении естественных (магнитотеллурических) полей космического происхождения. Эти методы предназначены для изучения горизонтально и полого залегающих структур. По сравнению с другими методами электроразведки глубинность у них наибольшая (до 500 км). Наряду с собственно магнитотеллурическими зондированиями (МТЗ) к ним условно можно отнести метод теллурических токов (МТТ), магнитотеллурические и магнитовариационное профилирования (МТП и МВП). Эти методы служат для картирования опорных горизонтов с высоким сопротивлением, например, карбонатных толщ или кристаллического фундамента.

1. Магнитотеллурическое зондирование. Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) и его глубинный вариант (ГМТЗ) основаны на изучении магнитотеллурических полей в широком, изменяющемся на два порядка и более, интервале периодов колебаний. Вследствие скин-эффекта глубина проникновения электромагнитного поля в землю тем больше, чем меньше частота f или больше период колебаний $T = 1/f$. Иными словами, длиннопериодные «теллурики» проникают на большую глубину, т.е. несут в себе информацию о глубинном строении, а короткопериодные вариации проходят на небольшую глубину и характеризуют только верхние части геологического разреза.



Рис.4.8 Общий вид магнитотеллурических кривых

Методика МТЗ сводится к длительным (иногда сутки) измерениям на одной точке взаимно перпендикулярных компонент (E_x, H_y, E_y, H_x) магнитотеллурического поля различного периода (не менее пяти — восьми значений E и H , различающихся по периоду примерно в 1,5 раза) с помощью электрораз-

ведочных станций. Общий вид магнитотеллурических кривых приведен на рис.4.8. В результате их обработки рассчитывают так называемые кажущиеся сопротивления

$$\rho_{T_{xy}} = 0,2T |E_x / H_y|^2, \quad \rho_{T_{yx}} = 0,2T |E_y / H_x|^2, \quad (4.10)$$

которые для однородного полупространства одинаковы и равны его истинному удельному сопротивлению [см. формулу (4.1)]. Для неоднородной среды ρ_T — сложная функция геоэлектрического разреза, определяемая в результате решения прямых задач МТЗ с помощью ЭВМ и зависящая от мощностей и сопротивлений слоев разреза.

В результате на бланках ВЭЗ с логарифмическим масштабом по осям координат строят кривые МТЗ. По горизонтальной оси откладывают \sqrt{T} — величину, пропорциональную глубинности исследования (чем больше T , тем больше глубина разведки), а по вертикальной оси — кажущиеся сопротивления $\rho_{T_{xy}}, \rho_{T_{yx}}$ и среднее $\rho_T = \sqrt{\rho_{T_{xy}} \rho_{T_{yx}}}$ (рис.4.9). Кривые МТЗ похожи на кривые ВЭЗ. При наземных и морских работах точки МТЗ располагают либо по системам профилей, либо равномерно по площади. Расстояния между точками изменяют от 1 до 10 км.

2. Методы теллурических токов, магнитотеллурического и магнитовариационного профилирования. При съемке теллурических токов (МТТ) одновременно регистрируют синхронные вариации электрических составляющих поля E_x и E_y на одном базисном (опорном) и на одном из рядовых пунктов изучаемой площади.

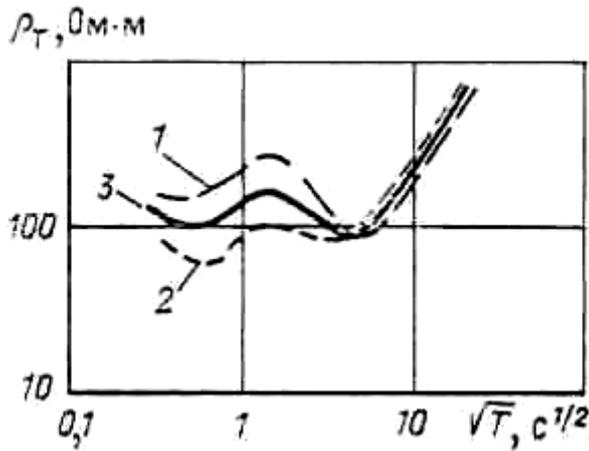


Рис. 4.9 Амплитудные кривые МТЗ

$\rho_{T_{xy}}$ (1), $\rho_{T_{yx}}$ (2), ρ_T (3)

Для синхронизации работ двух или нескольких станций, расположенных на расстоянии до 30—50 км от базисного пункта, используют радиостанции и специальные приборы, называемые телеключателями. В результате обработки записей поля теллурических токов рассчитывают разные теллурические параметры. Например, чаще всего определяют теллурический параметр $\mu = \delta(E_i) / \delta(E_o)$, где $\delta(E_i)$, $\delta(E_o)$ —

синхронные вариации поля на любой рядовой и базисной точках. Этот параметр характеризует относительные значения плотностей естественных токов и кажущихся сопротивлений в этих точках.

В отличие от МТТ при магнитовариационном профилировании (МВП) на полевых и базисных пунктах регистрируют вариации магнитного поля.

При магнитотеллурическом профилировании (МТП) на полевых пунктах одновременно регистрируют и электрические E_x , E_y , и магнитные H_x , H_y , H_z составляющие поля. Если при обработке магнитотеллурических программ выделять на всех пунктах вариации примерно одного небольшого интервала периодов колебаний, то получаемые параметры поля будут характеризовать разрез примерно одной глубины. В результате обработки магнитотеллурических программ для каждой точки рассчитывают так называемый импеданс ($Z_{xy} = E_x/H_y$ или $Z_{yx} = E_y/H_x$), который характеризует обобщенный геоэлектрический разрез.

В комбинированном магнитотеллурическом профилировании (КМТП) перечисленные параметры изучают синхронно и на полевом, и на базисном пунктах. В целом полевые работы при магнитотеллурическом профилировании выполняют на больших площадях. Точки наблюдения располагают на расстоянии около 1 км друг от друга.

Зондирование методом становления поля. Зондирование методом становления поля (ЗС или ЗСП) основано на изучении становления (установления) электрической (ЗСЕ) и магнитной (ЗСМ) составляющих электромагнитного поля в геологических толщах при подаче прямоугольных импульсов постоянного тока в заземленную линию или незаземленную петлю. Длительность и характер становления поля связаны с распределением удельного электрического сопротивления пород на разных глубинах. Изменение глубинности разведки в методе ЗС объясняют следующим образом [см. формулу (4.9)]. При включении импульса тока в питающую линию или петлю электромагнитное поле распространяется сначала в приповерхностных частях разреза, а в дальнейшем проникает все глубже и глубже. При этом в среде происходят сложные переходные процессы. В результате форма регистрируемого импульса будет отличаться от формы импульса, поданного в питающую установку. Малым временам становления поля соответствует малая глубина разведки, большим временам — большая. Максимальная глубинность ЗС около 5 км. Зондирование становлением поля выполняют с

помощью обычных электроразведочных станций при неизменном расстоянии между питающим и измерительным диполями. Электрическую и магнитную составляющие записывают одновременно автоматически.

Различают два варианта зондирования становлением поля: зондирование в дальней от питающего диполя зоне (ЗСД) и зондирование в ближней зоне (ЗСБ), называемое иногда точечным (ЗСТ). При выполнении ЗСД используют дипольные установки. Расстояние r между генераторной группой и полевой лабораторией выбирают постоянным, в 3—6 раз большим предполагаемой глубины залегания изучаемого опорного горизонта (как правило, кристаллического фундамента). В результате обработки записей становления поля рассчитывают кажущиеся сопротивления по электрической $\rho_{\tau E}$ и магнитной $\rho_{\tau H}$ составляющим для разных времен становления поля t , т.е. для разных времен после включения тока в линию AB или петлю. При этом

$$\rho_{\tau E} = k_E \Delta U_E(t) / I, \quad \rho_{\tau H} = k_H \Delta U_H(t) / I, \quad (4.11)$$

где k_E , k_H — геометрические коэффициенты установок; $\Delta U_E(t)$, $\Delta U_H(t)$ — напряжения, определяемые по осциллограмме для разных времен t ; I — ток в питающем диполе. Имея примерно семь — десять значений $\rho_{\tau E}$, $\rho_{\tau H}$ для разных времен, можно построить кривые становления поля, т.е. графики зависимости ρ_{τ} от параметра $\tau = \sqrt{2\pi t}$, пропорционального глубинности разведки. Кривые ЗСД строят на логарифмических бланках.

В методе ЗСБ разнос r постоянен и меньше проектируемых глубин разведки. В результате обработки записей ЗСБ получают значения разностей потенциалов в приемной петле ΔU_Z . Зная ток в питающей линии I и коэффициент установки k , рассчитывают кажущееся сопротивление:

$$\rho_{\tau} = k(I / \Delta U)^{2/3} t^{-5/3}. \quad (4.12)$$

Далее, как и при ЗСД, строят кривые ЗСБ. Кривые ЗС похожи на кривые ВЭЗ. Существуют и другие приемы обработки ЗС. Зондирования становлением поля выполняют по отдельным профилям или равномерно по площади. Расстояние между точками изменяют от 0,5 до 2 км. В результате интерпретации ЗС получают глубины залегания опорных (особенно с высоким сопротивлением) горизонтов. Из-за небольших размеров установок ЗСБ отличается от ЗСД большей детальностью и разрешающей способностью.

Частотное электромагнитное зондирование. Метод частотного электромагнитного зондирования (ЧЗ) основан на изучении электрической или магнитной составляющих электромагнитного поля, созданного в земле или электрическим диполем AB , или петлей, которые питаются переменным током с постепенно изменяющейся частотой. Метод ЧЗ напоминает, с одной стороны, метод ДЗ на постоянном токе, а с другой — магнито-теллурическое зондирование и предназначен для решения тех же задач — изучения горизонтально-слоистых сред с глубиной до 5—7 км. Как и при выполнении ДЗ, в методе частотных зондирований используют дипольные установки (чаще всего экваториальные). Однако в методе ЧЗ расстояние r между питающим AB и приемным MN диполями может оставаться постоянным. Принцип частотных электромагнитных зондирований (как и МТЗ) основан на скин-эффекте, т.е. на увеличении глубины разведки с уменьшением частоты питающего тока.

Методика проведения ЧЗ сводится к измерению тока I в линии AB и напряжения на приемном электрическом диполе E_x и магнитном диполе H_z . По этим параметрам рассчитывают кажущееся сопротивление на переменном токе

$$\rho_{\omega E} = k_E \frac{E_x}{I}, \quad \rho_{\omega H} = k_H \frac{E_z}{I}, \quad (4.13)$$

где k_E, k_H — коэффициенты установок, зависящие от расстояния между диполями, размеров диполей, частоты поля и числа витков в генераторной и приемной петлях. Расстояние r должно быть в 5—10 раз больше намечаемых глубин исследования, т.е. приемные установки располагают в дальней от источников поля зоне.

В результате выполнения ЧЗ на логарифмических бланках строят кривые ЧЗ для электрической и магнитной составляющих. По вертикали откладывают кажущееся сопротивление, а по горизонтали — параметр, пропорциональный глубинности, — $T^{1/2}$. Кривые ЧЗ, хотя и похожи на рассмотренные выше кривые ВЭЗ, но содержат дополнительные экстремумы, обусловленные структурой поля, а не влиянием слоев. Кроме амплитудных значений напряженности можно изучать разности фаз между E_x, H_z и опорной фазой тока (φ_E и φ_H). Измерение двух компонент поля и двух сдвигов фаз делает интерпретацию кривых ЧЗ более точной, чем при ДЗ. В результате интерпретации определяют сопротивления и мощности отдельных горизонтов в разрезе.

Высокочастотные зондирования. Особенностью высокочастотных методов зондирования является применение радиоволн частотой от 10 кГц до 500 МГц. На таких частотах наблюдается сильное затухание радиоволн и высокий скин-эффект. Поэтому эти методы можно применять лишь в условиях перекрывающих пород высокого сопротивления ($\rho > 1000$ Ом·м), когда глубины разведки превышают несколько десятков метров и когда эти методы могут иметь практическое значение. Рассмотрим сущность основных высокочастотных методов зондирований.

1. Метод вертикального индукционного зондирования (ВИЗ) основан на дистанционном зондировании на одной из частот диапазона 10—100 кГц. Разнос между передатчиком и приемником, например, аппаратуры типа ДЭМП, изменяется от единиц до нескольких десятков метров. Кривые ВИЗ, которые строят так же, как кривые ВЭЗ, позволяют изучать горизонтально-слоистые разрезы на глубинах до 20—50 м.

2. В методе радиоволнового зондирования (РВЗ) радиополе частотой от 0,5 до 20 МГц создается передатчиком и линейной антенной, расположенной на поверхности Земли. С помощью приемника с рамочной антенной измеряют напряженность магнитного поля. Прямая волна, распространяясь в верхнем слое, доходит до кровли второго слоя, отличающегося по электромагнитным свойствам, и отражается от него. В результате в первом слое наблюдается интерференция (сложение) волн. Изменяя частоту поля, можно получать в приемнике минимумы сигнала, когда прямая и отраженная волны приходят в противофазе, и максимумы, когда волны приходят в фазе. Если в результате наблюдений построить интерференционную кривую (график зависимости напряженности поля от частоты), то, анализируя минимумы и максимумы на ней, с помощью специальных формул можно определить глубины залегания отражающих контактов не глубже 100 м. Метод РВЗ применяют в условиях перекрывающих пород с высоким сопротивлением (лед, мерзлые породы, сухие пески и т. п.).

3. Радиолокационный метод (РЛМ), или импульсный метод радиолокации (ИМР), основан на принципе обычной радиолокации. Аппаратура для работ состоит из передатчика, приемника и приемно-передающих антенн. Передатчик излучает короткие (меньше 1 мкс) импульсы, которые проникают в Землю, отражаются от слоев с разными электромагнитными свойствами и улавливаются приемником.

По времени запаздывания между зондирующим и отраженным импульсами t и скорости распространения радиоволн v можно определить эхо-глубину (глубину по нормали к границе) залегания отражающего контакта $h = v \cdot t / 2$. Скорость распространения радиоволн в воздухе примерно 300 м/мкс, а в породах с высоким сопротивлением

ем примерно в $\sqrt{\epsilon_{отн}}$ раз меньше ($\epsilon_{отн}$ — относительная диэлектрическая проницаемость).

Работы ИМР можно проводить с помощью как неподвижных, так и движущихся (например, на машине или самолете) дислокационных установок. Из-за сильного затухания высокочастотных радиоволн в перекрывающем слое ИМР можно применять в условиях очень высоких сопротивлений верхних слоев. Практически этот метод нашел применение лишь для ледовой разведки и, в частности, для определения мощности покровных и горных ледников. Установлено, что скорость распространения радиоволн в чистых льдах составляет 168 м/мкс, поэтому мощность льда легко определить по формуле $h = 84t$.

4.3.2 Электромагнитные профилирования

Общая характеристика. Электромагнитное профилирование включает большую группу методов электроразведки, в которых методика и техника наблюдений направлены на то, чтобы в каждой точке профиля получить информацию об электромагнитных свойствах среды примерно с одинаковой глубины. При профилировании в отличие от зондирования во всех точках наблюдения сохраняется постоянная глубинность разведки. Для этого выбирают постоянные или мало изменяющиеся разности между питающими или приемными линиями r изучаемые частоты f или времена t переходного процесса. Выбор глубинности, точнее интервала глубин изучения геологического разреза, а значит r , f , t , зависит от решаемых задач и геоэлектрических условий. Глубину изучения обычно выбирают опытным путем, и она должна обеспечивать получение максимальных аномалий наблюдаемых или расчетных (например, кажущихся сопротивлений) параметров вдоль профилей или на площадях исследований. Таким образом, если зондирования предназначены для изучения горизонтально или полого залегающих слоев, то профилирования служат для исследования горизонтально-неоднородных геоэлектрических разрезов, представленных крутослоистыми средами или включениями объектов с разными электромагнитными свойствами.

Теория электромагнитных профилировании построена на математическом и физическом моделировании над физико-геологическими моделями, представленными одним или несколькими крутозалегающими пластами, а также включениями объектов правильной геометрической формы (шар, пласт, цилиндр, уступ, горст, грабен и т. д.). Интерпретация получаемых в результате профилировании графиков, карт графиков (корреляционных схем) и карт наблюдаемых параметров или кажущихся сопротивлений, как правило, качественная, реже — количественная.

Электромагнитные профилирования применяют для решения большого числа геологических задач, связанных с картированием крутозалегающих (углы падения больше 10—20°) осадочных, изверженных, метаморфических толщ, рудных и нерудных полезных ископаемых на глубинах до 500 м. Их используют при инженерно-геологических, мерзлотно-гляциологических, гидрогеологических и почвенно-мелиоративных исследованиях с целью выявления неоднородностей разреза по литологии и глинистости, увлажненности и обводненности, разрушенности и закарстованности, талому и мерзлотному состоянию, степени общей минерализации подземных вод и засоленности почв.

Метод естественного электрического поля. Метод естественного электрического поля (ЕП, МЕР) или метод самопроизвольных потенциалов (ПС) основан на изучении локальных электрических постоянных полей, возникающих в горных породах в силу окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных явлений. Небольшие самопроизвольные потенциалы существуют практически по-

всеместно. Интенсивные поля наблюдаются, как правило, только над сульфидными и графитовыми залежами. Естественные электрические поля могут возникать также при коррозии трубопроводов и других подземных металлических конструкций. Интенсивность токов коррозии увеличивается с ухудшением гидроизоляции этих конструкций, уменьшением удельного электрического сопротивления пород и увеличением их влажности. Для измерения ЕП применяют милливольтметры постоянного тока, например АЭ-72, и неполяризующиеся электроды.

Съемку естественных электрических потенциалов выполняют либо по отдельным линиям (профильная съемка), либо по системам обычно параллельных профилей, равномерно покрывающих изучаемый участок (площадная съемка). Направления профилей выбирают вкрест предполагаемого простирания прослеживаемых объектов, а расстояния между ними могут изменяться от 10 до 100 м и должны быть в несколько раз меньше ожидаемой длины рудных тел или иных разведываемых геологических объектов.

На каждом профиле равномерно размечают пункты измерения потенциалов. Расстояние между точками наблюдений (шаг съемки) изменяется от 5 до 50 м в зависимости от масштаба съемки, характера и интенсивности электрического поля. Оптимальным шагом можно считать шаг, несколько меньший предполагаемой глубины залегания верхней кромки разведываемых объектов и сравнимый с их поперечными размерами. Съемку естественных потенциалов можно выполнять двумя способами: а) потенциала, при котором измеряют разности потенциалов между одной неподвижной точкой и пунктами наблюдений изучаемого профиля или площади; б) градиента потенциала, при котором измеряют разность потенциалов между двумя электродами, расположенными на постоянном расстоянии друг от друга и перемещаемыми одновременно по профилям. В зависимости от масштаба съемки и категории местности отряд из двух-трех человек отрабатывает за смену от 50 до 300 точек наблюдений. Особенно высокую производительность получают при непрерывной съемке способом градиента потенциала с движущейся лодки или плота.

По результатам измерений естественных потенциалов строят графики потенциалов. При этом по горизонтальной оси откладывают точки наблюдения, по вертикальной — потенциалы самопроизвольной поляризации (вверх — положительные, вниз — отрицательные). По данным съемок строят также карты графиков и карты равных значений потенциалов. На них выделяют аномалии, соответствующие объектам с повышенной электрохимической активностью.

Электропрофилирование методом сопротивлений. Электрическое профилирование или электропрофилирование (ЭП)—это модификация метода сопротивлений, при которой вдоль заданных направлений (профилей) измеряют кажущееся сопротивление с помощью установок постоянного размера (разноса питающей линии AB), а значит, и примерно постоянной глубинности. Под глубинностью метода сопротивлений понимают глубину, на которую проникает основная часть электрического тока. Эта глубина тем больше, чем больше выбранное расстояние между питающими электродами. В теории электроразведки доказано, что в однородной среде свыше 70% всего тока, подводимого к двум электродам A и B , проходит не глубже, чем расстояние между A и B (разнос питающих электродов). Глубина проникновения тока будет больше, если расположенные под верхним слоем породы лучше проводят электрический ток, и, наоборот, меньше, если подстилающие породы характеризуются высоким сопротивлением. В среднем глубинность электроразведки методом сопротивлений составляет от 1/3 до 1/10 разноса AB . Оптимальный (рабочий) разнос электропрофилирования зависит от решаемых задач и строения геоэлектрического разреза. Его выбирают по данным ВЭЗ и опытных работ ЭП с разными разносами.

При электропрофилировании используют переносную электроразведочную аппаратуру (АЭ-72, АНЧ-3 и др.) и различные установки. Простейшей установкой для ЭП является симметричная $AMNB$, когда все электроды $AMNB$ с соединяющими их проводами последовательно перемещают вдоль линии наблюдений и через постоянные расстояния

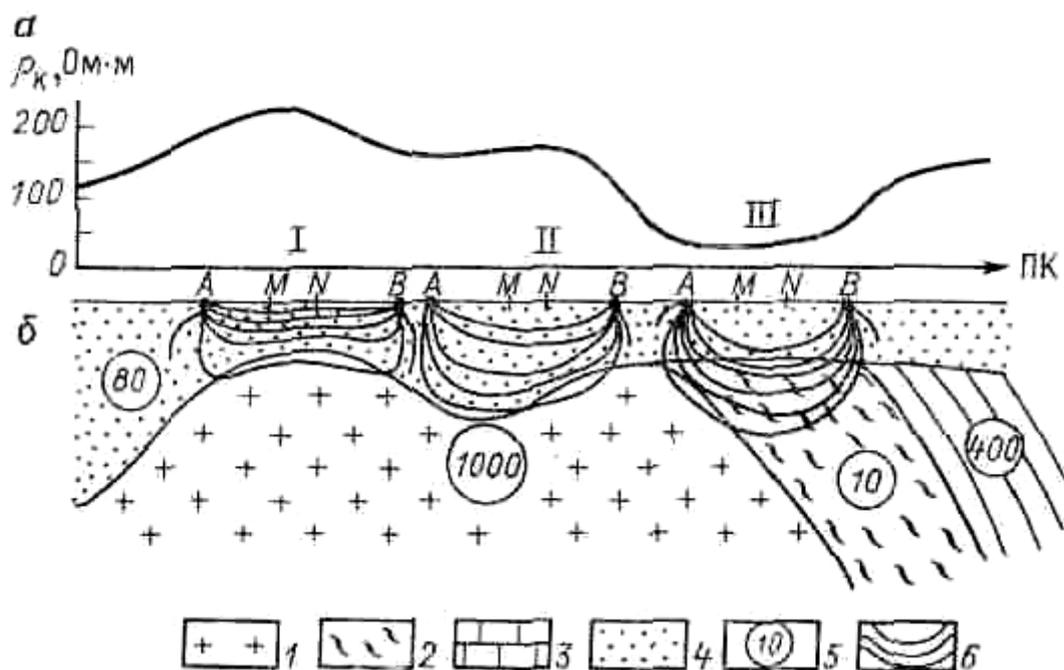


Рис.4.10 График кажущегося сопротивления по данным симметричного профилирования $AMNB$; а—график ρ_k ; б—геологический разрез.

- 1 — изверженные породы; 2 — сланцы; 3 — известняки, 4 — наносы;
5 — удельное электрическое сопротивление, Ом-м; 6 — токовые линии

измеряют кажущиеся сопротивления (взаимные расстояния между электродами во всех пунктах измерения остаются постоянными). Рассмотрим пример (рис.4.10). В точке I неглубоко под наносами залегают непроводящие изверженные породы, которые отжимают ток к поверхности. Поэтому вблизи приемных электродов MN увеличивается плотность тока и ρ_k будет больше сопротивления наносов [см. формулу (4.7)]. В точке II, где глубина залегания изверженных пород большая, ρ_k будет близко к сопротивлению наносов. В точке III под наносами залегают хорошо проводящие ток глинистые сланцы, которые втягивают токовые линии. Поэтому вблизи MN уменьшается плотность тока и ρ_k становится значительно меньше, чем сопротивление верхнего слоя.

По графику ρ_k (по горизонтали откладывают точки наблюдений, а по вертикали — полученные ρ_k) можно судить о геоэлектрическом разрезе, местоположении контактов пород с разными удельными сопротивлениями. Больше информации по сравнению с установкой $AMNB$ дает электропрофилирование установкой с двумя питающими линиями: $AA'MNB'B'$. Обычно $AB/A'B' = 2-4$, $MN \leq A'B'/2$. В результате строят два графика ρ_k . В сложных геологических условиях выполняют электропрофилирование с несколькими питающими линиями. Для выявления пластовых залежей используют трех-электродные и дипольные установки. Применяют и другие установки, электропрофилирования.

При электропрофилировании любой установкой профили прокладывают вкрест предполагаемого простирания структур или искомым объектов. Шаг установки, т.е.

расстояние между соседними точками наблюдений, обычно берут равным MN и несколько меньшим ожидаемой ширины разведываемых геологических объектов. В зависимости от типа установки, глубинности разведки (размера AB), категории местности, масштаба съемки отряд из четырех — семи человек обрабатывает за смену от 20 до 200 точек электропрофилирования. В результате электропрофилирования кроме графиков ρ_k строят карты графиков ρ_k , а также карты сопротивлений для каждого разноса питающих электродов. Их интерпретация дает возможность выявить объекты, различающиеся по удельному электрическому сопротивлению.

Электропрофилирование методом вызванной поляризации. При электропрофилировании методом вызванной поляризации (ВП или ЭП-ВП) работы вдоль профилей наблюдений выполняют установками с постоянными разносами. При этом наряду с ρ_k рассчитывают $\eta_k = (\Delta U_{ВП}/\Delta U) \cdot 100$ %, где $\Delta U_{ВП}$, ΔU — разности потенциалов на приемных электродах через 0,5 с и во время пропускания тока в питающую линию, а также скорость спада $\Delta U_{ВП}$ (рис.4.11).

Как отмечалось выше, причинами возникновения ВП являются сложные электрохимические процессы, проходящие на поверхности рудных и песчано-глинистых частиц в присутствии подземных вод при пропускании через породу тока. Вызванные потенциалы измеряют с помощью специальных электроразведочных станций или переносных одно- или многоканальных приборов. Работы проводят теми же установками, что и в методах сопротивлений (трех-, четырехэлектродные и др.).

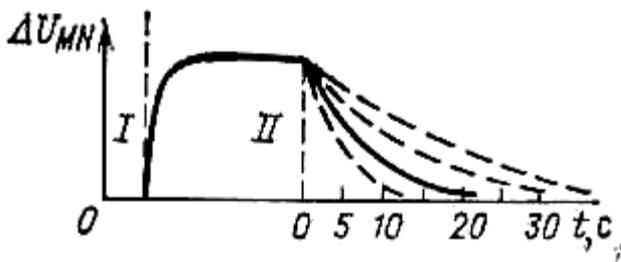


Рис.4.11 График зависимости ΔU_{MN} от времени после выключения тока в AB .

Ток в AB : I — включен; II — выключен

стей, сопротивлений и геометрических параметров разведываемых объектов и вмещающей среды. В результате ВП строят графики, карты графиков и карты η_k , на которых при интерпретации выявляют аномалии. К ним приурочены объекты с аномальной поляризуемостью.

Метод переменного естественного электромагнитного поля. К электропрофилированию, основанному на использовании естественных переменных электромагнитных полей атмосферного происхождения, относят методы переменного естественного электрического (ПЕЭП) и магнитного (ПЕМП) полей. В методе ПЕЭП с помощью милливольтметров типа АНЧ-3 и двух заземленных на расстоянии 10—20 м друг от друга приемных электродов MN за период 20—30 с измеряют среднюю напряженность электрического поля $E_{cp} = \Delta U_{MN} / MN$. Она пропорциональна некоторому кажущемуся сопротивлению среды на глубине, соответствующей применяемой частоте. При наиболее часто используемой частоте 10—20 Гц глубинность подобного профилирования составляет в разных геоэлектрических условиях несколько сотен метров.

Если проводить съемки ПЕЭП по профилям с шагом 10—20 м или равномерно по площади (направления MN должны во всех точках быть одинаковыми), то по графикам и картам E_{cp} можно выявлять горизонтальные неоднородности по электропроводности. Сходным образом с помощью рамочных антенн можно измерять различные составляющие магнитного поля (ПЕМП), отличающиеся простотой наблюдений вследствие

отсутствия заземлений. Интерпретируя аномалии ПЕЭП или ПЕМП на графиках и картах, можно получать информацию для средне- и крупномасштабного геологического картирования.

Низкочастотное гармоническое профилирование. Низкочастотные гармонические методы (НЧМ) включают большую группу методов электромагнитного (индукционного) профилирования, в которых поле на одной из частот интервала 10 Гц — 10 кГц создают с помощью либо заземленного на концах длинного (до 30 км) кабеля (ДК), либо большой (диаметром до 3 км) незаземленной петли (НП), либо рамочной антенны (диаметром до 1 м), как, например, в дипольном индукционном (ДИП) или дипольном электромагнитном (ДЭМП) профилировании.

В геологической среде первичное поле, с одной стороны, искажается неоднородностями, а с другой — создает вторичное индукционное вихревое поле. Суммарное электромагнитное поле, несущее в себе информацию о геоэлектрических неоднородностях, можно изучать различными приемами. Например, можно измерять амплитудные значения электрических и магнитных компонент с помощью разного рода микровольтметров (МКВЭ), изучать отношения амплитуд и разности фаз посредством так называемых афиметров (АФИ), определять элементы эллипса поляризации поля (ЭПП) и т.д.

Сокращенные названия методов индуктивного профилирования складываются из сокращенных названий способов возбуждения и измерения поля. Основные методы, используемые в индуктивной электроразведке: ДК-АФИ, ДК-ЭПП, НП-АФИ, ДИП-АФИ, ДИП-ЭПП и др. Глубинность НЧМ тем больше, чем ниже частота используемого поля, выше сопротивление вмещающих пород, больше размеры ДК или НП и расстояния между питающими и приемными рамками в ДИП. В зависимости от решаемых задач и геоэлектрических условий выбирают частоту поля, метод, размеры установки, масштаб и систему наблюдений.

Съемку в НЧМ проводят по системам профилей, отстоящих друг от друга на расстояниях 50—500 м и направленных перпендикулярно к простиранию геологических структур и кабелю или стороне петли (внутри и вне петли). Точки наблюдения на профилях, длина которых обычно меньше длины кабеля и стороны петли, разбивают не ближе 50—100 м от токонесущих проводов и располагают через 20—200 м друг от друга. Если в методах ДК и НП по мере удаления от кабеля или стороны петли глубинность несколько увеличивается, то в методе ДИП при постоянном разносе (обычно он изменяется в пределах от 20 до 200 м) между генераторной рамкой и точкой наблюдения она постоянна.

В результате НЧМ строят графики, карты графиков и карты наблюдаемых параметров поля, интерпретация которых позволяет выделить аномалии над неоднородными по сопротивлению геологическими объектами.

Метод переходных процессов. Метод переходных процессов (МПП) по физической природе является индуктивным, т.е. близок к НЧМ, но отличается применением не гармонических, а импульсных полей. В качестве генераторных линий используют незаземленные петли (НП-МПП) или рамочные антенны (ДИП-МПП), через которые пропускают кратковременные (длительностью до 50 мс) импульсы постоянного тока. В той же или другой петле (или рамке) измеряют переходные процессы, т.е. величины электродвижущей силы $U(t)$ на временах t в пределах от 10 до 50 мс.

Методика НП-МПП и ДИП-МПП такая же, как в НП и ДИП в рассмотренных выше методах НЧМ. В результате работ МПП строят графики и карты $U(t)/I$, где I — амплитуда тока в петле при постоянном t , что и обеспечивает постоянство глубинности во всех точках.

Аэроэлектроразведка. Разновидностью индуктивных методов электроразведки является воздушная электроразведка. Существует несколько вариантов аэроэлектроразведки. Все они основаны на измерении магнитной компоненты поля.

1. Одним из распространенных методов аэроэлектроразведки является метод бесконечно длинного кабеля (БДК-А), в котором первичное поле создают переменным током частотой до 1000 Гц, протекающим по заземленному на концах длинному кабелю (до 40 км). Кабель укладывают вдоль предполагаемого простирания пород. Измерительную станцию (например, станцию АЭРО-58) помещают на самолете или вертолете, который летает на небольшой высоте (50—500 м) по профилям длиной до 25 км, перпендикулярным к кабелю и расположенным на расстояниях 150—500 м друг от друга. Горизонтальные (перпендикулярные к кабелю) амплитудные и фазовые компоненты магнитного поля измеряют автоматически. Материалы обрабатывают с помощью ЭВМ, что сводится к построению карт графиков наблюдаемых компонент или рассчитанных по ним кажущихся (эффективных) сопротивлений и выявлению на них зон повышенных и пониженных сопротивлений.

2. В аэроварианте дипольного индукционного профилирования (ДИП-А) генераторную рамочную антенну располагают на самолете или вертолете, а измерительные рамки находятся либо на втором самолете или вертолете, летящем на расстоянии 100—500 м, либо в выносной гондоле на кабель-тросе длиной до 150 м. Высота полетов 50—250 м, расстояния между профилями 100—500 м, рабочие частоты выбирают в интервале от 0,2 до 3 кГц. В результате обработки получаемых при автоматической записи графиков и карт графиков наблюдаемых параметров ведут крупномасштабное геологическое картирование и поиск проводящих руд.

3. В аэроварианте метода переходных процессов (АМПП) генераторную рамку располагают на вертолете, а в выносной гондоле на кабель-тросе длиной до 50 м помещают приемную рамку для измерения $E(t)$. Высота полетов 50—100 м, расстояния между профилями около 100 м. По результатам обработки получаемых при автоматической записи сигналов ведут поиск массивных проводящих руд.

Радиоволновое профилирование. К радиоволновому профилированию (РВП) относят радиокомпарационную съемку на сверхдлинных волнах (СДВР) или радиоэлектромагнитное профилирование (РЭМП). При радиокомпарационной съемке на каждой точке измеряют вертикальную H_z и максимальную горизонтальную H_p составляющие радиополя. Профили разбивают вкрест предполагаемого простирания слоев. Расстояние между точками измерений изменяется от 20 до 50 м, а при детализации может быть и меньшим. Замеры на каждой точке проводят быстро (около 1 мин), поэтому производительность радиокомпарационного метода велика (100—300 точек в смену). Съемку можно вести и с движущегося транспорта (машины, самолета).

В результате строят графики H_z , H_p вдоль профилей наблюдений. Над однородной по электромагнитным свойствам (ρ , ε , μ) средой H_y остается постоянной, а $H_z=0$. Наличие границ раздела слоев с разными электромагнитными свойствами или проводящих ток рудных жил приведет к искажению поля.

Радиоэлектромагнитное профилирование (РЭМП) отличается от СДВР измерением и электрических, и магнитных составляющих радиополя.

Сверхвысокочастотное профилирование. Сверхвысокочастотные методы электроразведки включают: радарную съемку (длины изучаемых радиоволн изменяются от 1 мм до 1 м), при которой изучают либо естественное излучение земной поверхности [пассивная радиолокация, радиотепловая (РТС) или инфракрасная (ИКС) съемки], либо отраженные от нее радиоволны [активная радиолокация или радиолокационная (РЛС) съемка]. Работы ведут в основном с летательных аппаратов (спутники, самолеты, вер-

толеты) с помощью специальной автоматической (телеметрической или регистрирующей) аппаратуры.

Пьезоэлектрические методы. К пьезоэлектрическим относят геофизические методы, находящиеся на стыке между электроразведкой и сейсморазведкой (см. гл.1). Сущность этих методов сводится к возбуждению упругих волн с помощью взрывных или невзрывных источников и изучению упругих волн, как при сейсморазведке, и электромагнитных сигналов, как в импульсных методах электроразведки. Пьезоэлектрические методы основаны на пьезо- и сейсмозлектрических эффектах (ПЭЭФ и СЭЭФ), существующих в породах с повышенными пьезоэлектрическими модулями. На различии названных эффектов основаны два ведущих пьезоэлектрических метода: собственно пьезоэлектрический метод (ПЭМ), применяющийся при изучении кристаллических пород, и метод сейсмозлектрических потенциалов (МСЭП), использующийся при изучении осадочных пород.

Методика и техника наземных работ в пьезоэлектрическом методе сходны с такими при наземной сейсморазведке. Возбуждение упругих волн осуществляют с помощью небольших взрывов (подрыв электродетонаторов, детонирующего шнура и т.п.) или ударов. При прохождении упругих волн в породах с повышенным пьезоэлектрическим эффектом генерируются электромагнитные колебания звуковых частот. Наряду с упругими колебаниями, улавливаемыми сейсмоприемниками, в методе ПЭМ изучают электрические E составляющие поля с помощью заземленных линий MN , реже магнитные — посредством рамочных антенн. Для работ используют шести- и восьмиканальные станции, мало отличающиеся от обычных сейсмических станций. Сейсмоприемники и датчики E или H располагают рядом. Расстояния между соседними пунктами возбуждения и измерения изменяются от 2 до 20 м.

В наземном варианте ПЭМ используют продольное, непродольное и круговое профилирование. Для детализации аномалий наблюдения проводят по профилям, проходящим вкрест и вдоль аномалий. Расстояние между профилями должно быть в 2—4 раза меньше предполагаемой длины разведываемого объекта.

При обработке пьезоэлектросейсмограмм, т.е. записей упругих и электромагнитных волн в ПЭМ, определяют времена первых вступлений и максимальные амплитуды упругих и электромагнитных импульсов. Далее строят графики амплитуд и графики отношений амплитуд электромагнитной и упругой волн. Методика и техника работ при изучении сейсмозлектрических потенциалов такая же, как и в пьезоэлектрическом методе. Различие лишь в природе возбуждаемых электромагнитных полей. Интерпретируя материалы ПЭМ и МСЭП, выявляют геологические объекты с повышенными пьезоэлектрическими модулями.

4.3.3 *Подземные методы электроразведки*

Общая характеристика. Подземные методы электроразведки предназначены для объемного изучения пространства между горными выработками, скважинами и земной поверхностью, т.е. для решения ряда геологоразведочных задач в трехмерном пространстве. При подземных работах можно применять большинство методов полевых электромагнитных зондирования и профилирования. Однако особенности измерений в горных выработках и скважинах требуют применения специальной аппаратуры, методики, теории и приемов интерпретации. Кроме того, благодаря возбуждению поля вблизи уже обнаруженных полезных ископаемых удается проводить объемное изучение и просвечивание массивов пород. Это повышает глубинность и эффективность электроразведки на этапах детализационных исследований месторождений полезных ископаемых. Наибольшее применение подземные методы электроразведки находят при

разведке рудных месторождений как при подготовке, так и в ходе их промышленной эксплуатации.

Геоэлектрoхимические методы. Изучение пород и руд, расположенных в окрестностях скважин и горных выработок, удобно проводить с помощью методов естественной и вызванной поляризации. Например, на сульфидных, некоторых полиметаллических, железорудных, графитовых месторождениях, где существуют естественные поля окислительно-восстановительной природы, целесообразно использовать подземные (скважинный и рудничный) варианты метода естественного поля (МЭП) (см. п. 4.1). При этом один приемный электрод остается неподвижным, а с помощью второго изучают потенциалы естественного электрического поля как по равномерной сети на поверхности, так и во всех имеющихся скважинах и горных выработках. На рудных месторождениях весьма перспективны также подземные (скважинный и рудничный) варианты метода вызванной поляризации (ВП). Изучив объемное распределение ЭП или ВП и зная, что объем аномального поля в десятки раз больше объема создавших их рудных тел, можно получить информацию о пространственном положении тел. Это важно для постановки дальнейшей разведки месторождения, например, бурением.

Кроме скважинных методов ЭП и ВП к геоэлектрическим методам относят контактный и бесконтактный способы поляризационных кривых (КСПК и БСПК) и частичного извлечения металлов (ЧИМ). Сущность КСПК сводится к пропусканию постоянного тока через вскрытую скважиной рудную залежь и регистрации контактной разности потенциалов между этой залежью и стандартным электродом сравнения, заземленным на земной поверхности, вдалеке от рудной залежи при плавном увеличении тока. Получаемые в результате работ КСПК поляризационные кривые (графики зависимости контактной разности потенциалов от пропускаемого тока) позволяют судить о количественном и качественном состоянии руд. В методе БСПК те же поляризационные кривые, что и в КСПК, получают при заряде вне рудного тела. Методы КСПК и БСПК служат для оценки по поляризационным кривым минерального состава и объемного содержания выявленных минералов в рудной залежи (см. п. 4.1).

В методе ЧИМ постоянный ток пропускают через постоянно заземленный в залежь электрод *A* и перемещающийся по равномерной сети (с шагом до 20x20—50x50 м) на земной поверхности второй питающий электрод *B*, называемый элементоприемником. Пропускание в течение нескольких часов *t* тока приводит к накоплению вблизи электрода *B* химических элементов вследствие их электролитического переноса из рудного тела, в которое заземлен электрод *A*. Измеряя с помощью методов химического анализа массу m_i того или иного химического элемента *i*, например Fe, Pb, Zn и других, и зная *t*, можно построить геоэлектрoхимический годограф (график зависимости *m* от *t*). Получив подобные годографы на всех точках наблюдений и построив карты *m* (для $t=const$) или $\Delta m/\Delta t$, можно по максимумам на них выявить эпицентры рудных залежей того или иного состава.

Метод заряженного тела. Метод заряженного тела (МЗТ) или заряда (МЗ) служит для оценки либо формы и положения рудных тел (рудный вариант МЗТ), либо направления и скорости движения подземных вод (гидрогеологический вариант МЗТ).

1. Рудный вариант МЗТ сводится к «заряду» с помощью электрода *A* рудной залежи через скважину или горную выработку постоянным или низкочастотным переменным током (второй электрод *B* отнесен «бесконечно далеко», т.е. на расстояние в 5—10 раз больше, чем глубина заземления электрода *A*). На земной поверхности с помощью приемной линии *MN* и приборов типа АЭ-72 или АНЧ-3 (см. п. 4.2) изучают распределение потенциалов. В результате строят эквипотенциальные линии. Можно измерять также градиенты потенциала или напряженности переменного магнитного

поля. Так как заряженная рудная залежь является эквипотенциальным проводником, с которого ток стекает равномерно, вокруг нее образуются поверхности равного потенциала, повторяющие форму залежи. Поэтому по форме эквипотенциальных линий можно судить о местоположении и контуре эпицентра рудной залежи, т.е. проекции его формы на земную поверхность.

2. Детализационным вариантом МЗТ является метод электрической корреляции (МЭК), в котором потенциалы точечного заряда в рудной залежи изучают не только на земной поверхности, но и в соседних скважинах. В результате происходит «просвечивание» целиков пород между скважинами. По форме и аномалиям на кривых потенциала в скважинах можно судить о наличии и местоположении в межскважинном пространстве рудных тел.

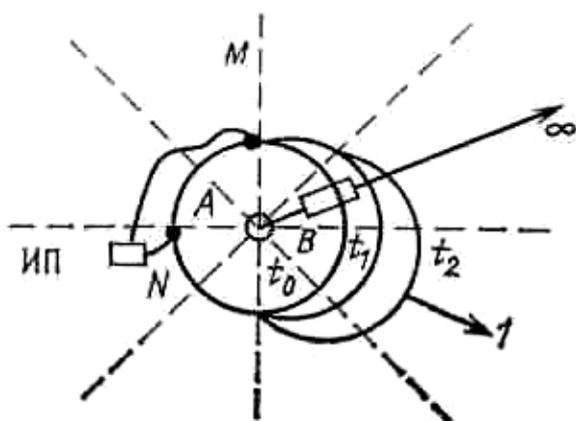


Рис.4.12. Схема определения направления и скорости движения подземного потока по одной скважине МЗТ.

AB — питающая линия; *MN* — приемная линия; *B* — батарея; *ИП* — измерительный прибор; *1* — направление потока; t_0, t_1, t_2 — эквипотенциальные линии, полученные в разное время после засоления скважины.

3. В гидрогеологическом варианте МЗТ направление и скорость подземного потока определяют по искажению во времени изолиний потенциала от точечного источника, заземленного в подземный поток через скважину (рис.4.12). При этом водный поток периодически подсаливается поваренной солью и в нем образуется «проводящее» тело, которое движется вместе с потоком. Поэтому направление движения потока будет совпадать с направлением максимального искажения изолиний, а скорость движения $\Delta R/\Delta t$, где ΔR — максимальное смещение изолиний за время Δt . Гидрогеологический вариант МЗТ интересен тем, что динамику подземных вод можно изучать по одной скважине, в то время как гидрогеологам для этих же целей нужны три-четыре скважины.

Индуктивное просвечивание. Для обследования околоскважинных пространств в целях обнаружения проводящих

рудных тел применяют различные скважинные электромагнитные (индуктивные) методы, которые по физической сущности, применяемой аппаратуре и принципам интерпретации похожи на рассмотренные выше НЧМ и МПП. Наиболее известными скважинными индуктивными методами, основанными на применении низкочастотных гармонических и неустановившихся полей, являются методы незаземленной петли со скважинными измерениями параметров поля (НПС-АФИ или САФИ, НПС-МПП) и методы скважинного дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМПС-АФИ, ДЭМПС-МПП).

Для предварительных обследований во всех скважинах на оптимальной частоте или времени переходного процесса ведут измерения тех или иных параметров и в результате вдоль скважин строят графики. На них аномалиями выделяются участки скважин, которые ближе всего располагаются от рудных тел. Для детализации аномалий работы проводят на разных частотах или временах переходного процесса. С помощью скважинных индуктивных методов выявляют рудные тела на расстояниях до 40—100 м от скважины, оценивают их электропроводность, а также пространственное положение.

4.3.4 Метод радиоволнового просвечивания

Для изучения целиков пород между выработками и скважинами и выявления рудных залежей используют также метод радиоволнового просвечивания (РВП). В этом методе в одной выработке или скважине устанавливают радиопередатчик, излучающий электромагнитные волны частотой 0,1—10 МГц, а в соседних выработках или скважинах с помощью радиоприемника измеряют напряженность поля (см. п. 4.2). Напряженность поля может быть оценена выражением

$$H = H_0 \frac{e^{-br}}{r} \sin \theta \quad (4.14)$$

где H —измеряемая амплитуда напряженности магнитного поля; H_0 —начальная амплитуда, зависящая от излучаемой мощности; r —расстояние между передающей и приемной антеннами; b — коэффициент поглощения энергии вдоль радиуса r ; θ —угол между осью передающей антенны и направлением r .

Изменяя местоположение генератора и приемника, можно «просветить» породы между горными выработками, определить коэффициент поглощения пород, который связан с электромагнитными свойствами среды.

Наличие хорошо проводящих рудных тел приводит к увеличению затухания энергии и появлению радиотеней, по которым можно оконтурить рудные тела и правильно направить дальнейшие разведочные работы. Метод РВП применяют для поисков и разведки слепых рудных жил, изучения тектонических нарушений и обводненных зон. Дальность просвечивания не превышает нескольких сотен метров.

Подземный вариант ПЭМ. Пьезоэлектрический метод используют при профилировании вдоль горных выработок и просвечивании целиков пород между ними. В результате в стороне от выработок выявляют и оконтуривают слепые пьезоэлектрически активные объекты (кварцевые, пегматитовые и другие тела), что важно для доразведки месторождений. Дальность разведки составляет первые десятки метров.

4.4 Интерпретация данных электроразведки и решаемые задачи

Как и в других методах геофизики, существуют качественные и количественные приемы интерпретации данных электроразведки. При качественной интерпретации ведут визуальное выделение аномалий, позволяющее оценить наличие и положение разведываемых объектов. В результате количественной интерпретации определяют их глубины залегания, геометрические размеры и электромагнитные свойства. Наиболее ответственным этапом интерпретации является геологическое истолкование результатов, которое будет тем достовернее, чем полнее используются не только данные, полученные разными геофизическими методами, но и главным образом вся возможная геолого-гидрогеологическая информация.

4.4.1 Интерпретация электромагнитных зондирований

Качественная интерпретация. Как известно (см. п. 4.3), в результате электромагнитных зондирований (ЭМЗ) получают кривые зависимости кажущихся сопротивлений (ρ_{κ} , ρ_{τ} , ρ_{ω} , ρ_r) или поляризуемостей (η_{κ}) от параметров глубинности ($AB/2 = r$, \sqrt{T} , $\sqrt{2\pi t}$). При качественной интерпретации в результате визуального анализа кривых определяют число слоев в разрезе (см. рис. 4.6), типы кривых. Выявленные электрические горизонты сопоставляют с геологическими слоями. По данным площадных ЭМЗ строят карты типов кривых ВЭЗ, иногда абсцисс и ординат экстремумов на кривых. По профильным наблюдениям строят разрезы кажущихся сопротивлений, а по данным

ВЭЗ кроме них — разрезы кажущихся продольных проводимостей ($S_k = r/\rho_k$) для выявления хорошо проводящих слоев или кажущихся поперечных сопротивлений ($T_k = r/\rho_k$) для выделения плохо проводящих слоев. При построении этих разрезов по вертикали откладывают параметр глубинности, проставляют ρ_k , S_k или T_k и проводят изолинии. Анализ этих материалов позволяет дать общую характеристику и степень изменчивости геоэлектрических разрезов в плане и по глубине. Кривые ЭМЗ на участках, где изолинии на разрезе почти параллельны, не искажены горизонтальными неоднородностями, их используют для количественной интерпретации.

Количественная интерпретация. При количественной интерпретации ЭМЗ получают послойные мощности h_i , сопротивления ρ_i , поляризуемости η_i , и (или) суммарные обобщенные мощности H , продольные проводимости $S = H/\rho_l$ и среднее удельное сопротивление ρ_l , поперечное сопротивление $T = H\rho_n$ и среднее удельное сопротивление ρ_n . Существуют графоаналитические, палеточные и машинные способы интерпретации ЭМЗ.

1. С помощью **графоаналитических способов** по асимптотическим и экстремальным значениям кажущихся сопротивлений находят некоторые обобщенные параметры. Например, если к правой ветви кривых ЭМЗ, полученных над опорным горизонтом высокого сопротивления, например кристаллическим фундаментом, провести асимптоты, то по точкам их пересечения (x_{S1} , x_{S10} , x_{S100}) с горизонтальными линиями, ординаты которых y 1; 10; 100 (рис. 4.13), можно определить суммарную продольную проводимость толщи по следующим формулам:

$$S = \frac{1}{3}(x_{S1} + x_{S10}/10 + x_{S100}/100) = r_s / \rho_{KS} \quad (\text{для ВЭЗ, ДЭЗ, ДАЗ})$$

$$S = \frac{1}{3}(356x_{S1} + 114,5x_{S10}/10 + 35,6x_{S100}/100) = 356\sqrt{T_s} / \rho_{TS} \quad (\text{для МТЗ})$$

$$S = \frac{1}{3}(503x_{S1} + 159,5x_{S10} + 50,3x_{S100}) = 503\sqrt{2\pi t_s} / \rho_{\omega S} = 503\sqrt{T_s} / \rho_{\omega S} \quad (\text{для ЗСД и ЧЗ})$$

$$S = \frac{1}{3}(189x_{S1} + 59,5x_{S10} + 18,9x_{S100}) = 189\sqrt{2\pi t_s} / \rho_{\omega S} \quad (\text{для ЗСП})$$

(4.15)

где r_s , ρ_{KS} , ρ_{TS} , T_s , $\rho_{\omega S}$, t_s , ρ_{TS} — координаты любых точек асимптоты. Существует и ряд других графоаналитических приемов определения различных параметров разреза.

2. Применяют также **палеточные методы** интерпретации ЭМЗ. Палетки—это набор теоретических кривых. Для разных методов ЭМЗ их рассчитывают с помощью ЭВМ. Процесс количественной интерпретации сводится к совмещению экспериментальной (полевой) кривой, вычерченной на прозрачном бланке, с одной или несколькими теоретическими кривыми из альбома палеток. Разумеется, полевые и теоретические кривые должны быть построены в одинаковых масштабах. Рассмотрим принципы применения палеток на примере интерпретации кривых ВЭЗ.

Проще всего интерпретировать двухслойные кривые ВЭЗ. Для этого, соблюдая параллельность осей координат двухслойной палетки и бланка с полевой кривой, совмещают ее с одной из теоретических кривых. Иногда полевая кривая не совпадает ни с одной из теоретических, а располагается между двумя соседними. В этом случае параметры получают путем интерполяции. Индексы сопротивлений и глубин на палетке (крест палетки) отсекают на осях координат полевого бланка сопротивление верхнего слоя ρ_1 и его мощность h_1 . По модулю совпавшей теоретической кривой $\mu = \rho_2/\rho_1$, зная ρ_1 , получаем $\rho_2 = \mu \rho_1$.

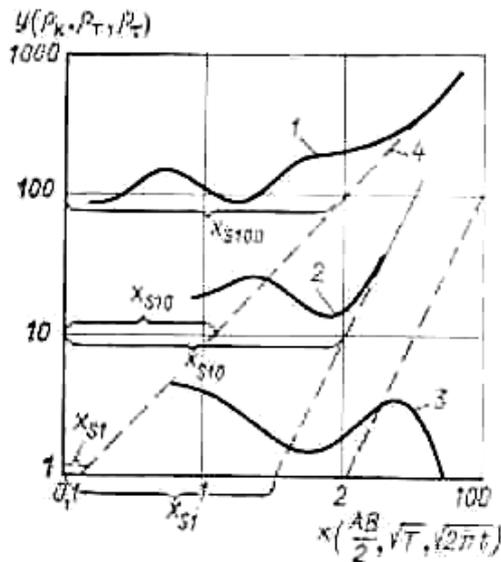


Рис.4.13 Схема интерпретации кривых ВЭЗ (1), МТЗ (2), ЗСМ (3) методом S (линии 4)

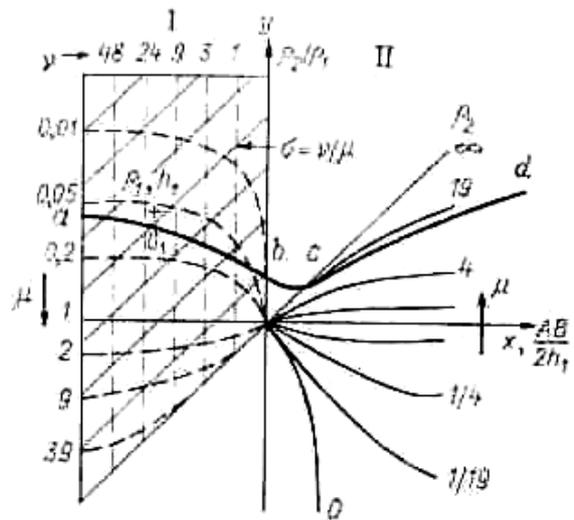


Рис.4.14 Схема интерпретации полевой кривой ВЭЗ (а, б, с, д) с помощью номограммы (I) палетки (II) типа НА

При интерпретации трехслойных полевых кривых их совмещают с теоретическими кривыми соответствующих типов и одинаковой формы. Добившись наиболее точного совмещения полевой кривой с теоретической, по индексам на палетке определяют ρ_1, h_1 , а по параметрам совпавшей теоретической кривой — модули $v = h_{2np}/h_1, \mu = \rho_{2np}/\rho_1, \rho_3$. Отсюда легко получить приближенные значения мощности $h_{2np} = v h_1$, и примерное сопротивление $\rho_{2np} = \mu \rho_1$ второго слоя. При $v > 5-10$ приближенные значения мало отличаются от истинных, а при $v < 3$ различия могут быть значительными. Многослойные кривые также могут быть проинтерпретированы трехслойными палетками. Правда, чем больше слоев, тем точность интерпретации меньше. В этом случае целесообразно проводить интерпретацию с помощью ЭВМ.

Ускоренную интерпретацию кривых ЭМЗ проводят с помощью одной-двух для каждого метода номограмм-палеток, подготовленных В. К. Хмелевским. Они представляют собой комбинацию двухслойной палетки соответствующего ЭМЗ и вспомогательной палетки, которая заменяет вышезалегающие породы слоем с такими эквивалентными мощностью $h_э$ и сопротивлением $\rho_э$, чтобы электромагнитное поле на земной поверхности оставалось одним и тем же по интенсивности и структуре.

При интерпретации трехслойной кривой с помощью номограммы-палетки сначала с двухслойной палеткой совмещают левую ветвь (а, б) полевой кривой, оценивают параметр μ , а на бланке проставляют крест палетки O_1 с координатами h_1, ρ_1 (рис.4.14). Затем с двухслойной палеткой совмещают правую ветвь (с, д), а положение точек h_1, ρ_1 на номограмме дает возможность определить следующие параметры: $v, \mu, \sigma = v/\mu$ (для кривых типа Н и А), $\tau = v\mu$, для кривых типа К и Q, которые и являются искомыми параметрами интерпретируемой полевой кривой. После совмещения правой ветви с двухслойной палеткой на полевой бланк можно перенести второй крест с координатами $\rho_э, h_э$. Эта эквивалентная точка служит для дальнейшей интерпретации кривой ВЭЗ, если число слоев на ней больше трех.

3. Интерпретация ЭМЗ с помощью ЭВМ отличается более высокой точностью, а самое главное — быстротой и объективностью в получении основных параметров разреза.

4. Решение обратной задачи электроразведки неоднозначно, т.е. полевая кривая может быть совмещена с несколькими теоретическими, а значит, может получиться несколько приближенных значений h_{2np} , ρ_{2np} , h_{3np} , ρ_{3np} и т. д., иногда значительно отличающихся друг от друга. Эта неоднозначность интерпретации кривых зондирования является следствием так называемого принципа эквивалентности (или некорректности решения обратной задачи зондирования). Сущность принципа эквивалентности сводится к тому, что для некоторых соотношений сопротивлений ($0,3 > \mu > 3$) и мощностей ($\nu < 3$) слоев геоэлектрического разреза изменения μ и ν в определенных пределах могут не изменять вид кривой. Поэтому для точного определения мощностей всех горизонтов надо знать их сопротивления так же, как при гравиразведке нужно знать плотность, а в магниторазведке — магнитную восприимчивость.

5. В результате интерпретации электромагнитных зондирования строят геоэлектрические разрезы так же, как по скважинам строят геологические. По горизонтали откладывают центры зондирования, а вниз по вертикали — глубины до выявленных горизонтов и мощности слоев. В центре слоев проставляют значения сопротивлений. Слои с примерно одинаковыми сопротивлениями объединяют в отдельные горизонты, в том числе опорные, т.е. такие, у которых мощности и сопротивления мало изменяются по профилю или площади.

Кроме того, по данным зондирования строят структурные карты по кровле опорных горизонтов высокого или низкого сопротивления и карты мощностей тех или иных слоев. Сопоставляя их с геологическими данными, можно говорить о соответствующих структурных геологических картах.

Особенности применения электромагнитных зондирования. Несмотря на то что все методы электромагнитных зондирования предназначены для расчленения горизонтально- и полого-слоистых сред, их геологические возможности разные и зависят прежде всего от проектируемой глубинности и решаемых задач (см. п. 4.3). Для мало-глубинных (до 100 м) исследований целесообразно применять ВЭЗ, ВЭЗ-ВП (если есть уверенность в изменении поляризуемости разных слоев); ВИЗ в условиях повышенных (больше 100 Ом м) сопротивлений и при плохих условиях заземления; РВЗ, РЛМ (ИМР) в разрезах высокого (больше 1000 Ом м) сопротивления, например, при изучении льдов, мерзлоты, поисках подземных вод в пустынях. При разведке глубин до 500 м можно применять ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, а также ЗСБ и ЧЗ (особенно при наличии в разрезе карбонатных или галогенных экранов высокого сопротивления), РЛМ (при ледовой и мерзлотной разведке). При структурных исследованиях на суше и морях до глубин 5—10 км иногда используются ДЗ, а чаще магнитотеллурические методы и прежде всего МТЗ, а также ЗСД и ЗСБ. Изучение глубинной неоднородности Земли можно проводить с помощью глубинных МТЗ (ГМТЗ).

Каждую из названных задач можно решать несколькими методами. Вследствие неоднозначной интерпретации и их разной физической природы целесообразно применять два-три зондирования, например, в таких сочетаниях: ВЭЗ и ВЭЗ-ВП; ВЭЗ и ЧЗ; ВЭЗ и ЗС; ВЭЗ и РЛЗ; МТЗ, ЗС и ВЭЗ. В любых условиях при решении разных задач для более однозначной интерпретации электромагнитных зондирования необходима дополнительная информация по параметрическим скважинам из расчета хотя бы одна — пять скважин на сто точек зондирования при изменении глубины разведки от первых километров до десятков метров соответственно. Эффективность электромагнитных зондирования повышается при комплексировании их с сейсморазведкой и гравиразведкой.

4.4.2 Интерпретация данных электромагнитного профилирования

Данные различных методов электромагнитного профилирования (ЭП, ВП, ЕП, ПЕЭП, ПЕМП, НЧМ, МПП, аэроэлектроразведка, РВП, РТС, РЛС), представленные в виде графиков, карт графиков (корреляционных планов) и карт тех или иных наблюдаемых или расчетных параметров, несут в себе информацию о геоэлектрических неоднородностях вдоль профилей или по площади в определенном интервале глубин (см. п. 4.3). Интерпретация данных электромагнитного профилирования в основном качественная, реже количественная.

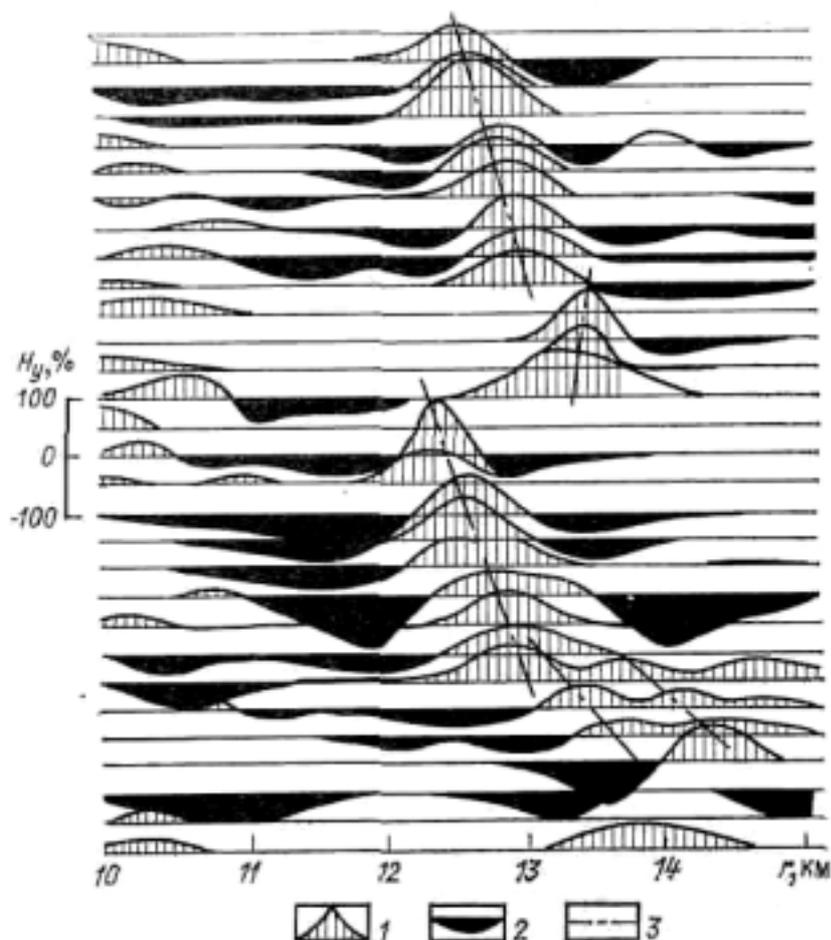


Рис.4.15 Карта графиков H_y , полученная при электромагнитном профилировании методом аэроэлектроразведки ДК.

- 1, 2 — положительные и отрицательные аномалии;
- 3 — оси аномалий, приуроченные к тектоническим нарушениям

Качественная интерпретация. Сущность качественной интерпретации электромагнитного профилирования сводится к визуальному (или с помощью вероятностно-статистических методов) выявлению аномалий, т.е. отклонений наблюдаемых параметров поля или кажущихся сопротивлений, поляризуемостей, естественных потенциалов и других наблюдаемых параметров от первичного (нормального) или среднего (фоновое) поля; определению их положения в плане; оценке геологической природы аномалообразующих объектов (рис.4.15). Аномалию считают достоверной, если она удовлетворяет правилу «трех сигм и трех точек», т.е. амплитуда аномалий превышает 3σ (где σ — средняя квадратическая или близкая к ней относительная средняя арифметическая погрешность съемки) и прослеживается не менее чем на трех точках профиля. С

помощью вероятностно-статистических методов и ЭВМ выявляют аномалии с амплитудой, близкой к σ .

Форма и простираание аномалий электромагнитного профилирования обычно соответствуют плановому положению создавших их объектов. Ширина l аномалии над тонким ($l < h$) объектом зависит от глубины залегания его верхней кромки h , а над толстым ($l > h$) от его ширины L . Форма и интенсивность аномалий, а значит, и эффективность профилирования зависят от следующих природных и технических факторов:

- 1) отношения глубины залегания h к поперечным размерам d геологических объектов (обычно выделяют объекты с $h/d < 2—5$);
- 2) контрастности электромагнитных свойств объектов и вмещающей среды, а в индуктивных методах — от абсолютных электропроводностей объектов;
- 3) используемого метода профилирования и выбранных значений r, f, t ;
- 4) интенсивности первичного (питающего) поля и его поляризации, т.е. направления вектора E по отношению к простираанию объектов (например, при E -поляризации, т.е. когда вектор E совпадает с простираанием объектов, в проводящих телах индуцируются максимальные вторичные магнитные поля);
- 5) примененной измерительной аппаратуры, которая может различаться возможностями измерений различных параметров поля с разной помехозащищенностью.

Количественная интерпретация. Количественная интерпретация данных электромагнитного профилирования сводится к определению (чаще оценке) формы, глубины, иногда размеров, физической и геологической природы аномалий. Она начинается с выбора физико-геологических моделей, которыми можно аппроксимировать разведываемые объекты: контакты сред, мощные ($l > h$) и тонкие ($l < h$) пласты, изометрические (шарообразные), вытянутые (линзообразные, цилиндрические) тела и др. Решение

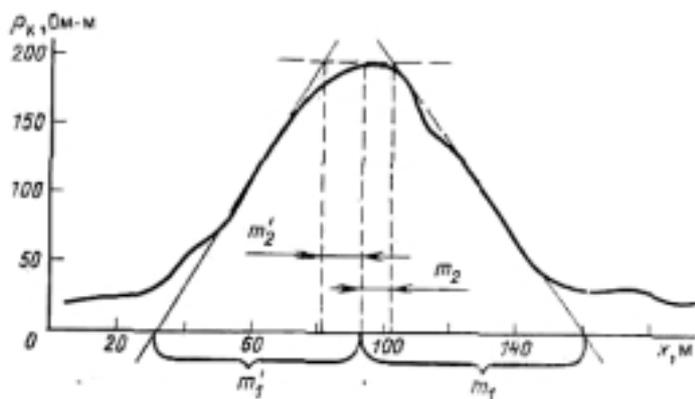


Рис.4.16 График электропрофилирования (ЭП) и схема его интерпретации способом касательных

прямых и особенно обратных задач методами математического и физического моделирования для перечисленных моделей сложнее, чем для зондирования. Тем не менее, в каждом методе существуют аналитические и графические приемы количественной интерпретации.

Простейшим способом оценки глубины залегания верхней кромки тела h является способ касательных, используемый в магниторазведке (см. гл.3). С его помощью ин-

терпретируют четкие локальные аномалии, называемые аномалиями кондуктивного типа и получаемые в методах ЕП, ЭП, ВП, ПЕЭП и некоторых других. В этом способе касательные проводят к максимуму, минимумам и боковым граням (рис.4.16). По разностям абсцисс точек пересечения касательных (m_1 и m_2) можно определить h по формуле

$$h = a(m_1 - m_2), \quad (4.16)$$

где параметр a в разных методах профилирования изменяется для пастообразных объектов от 0,2 до 0,5, а для изометрических тел — от 0,4 до 1.

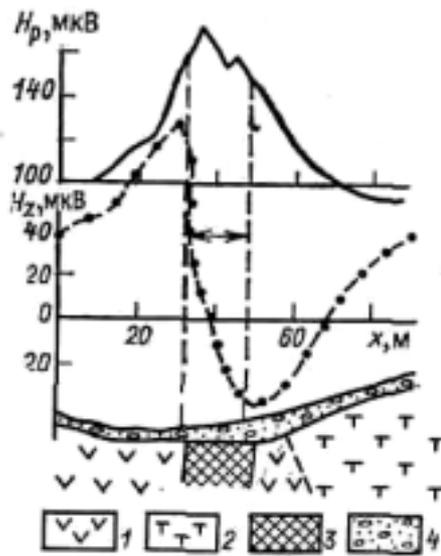


Рис.4.17 Результаты электромагнитного профилирования методом радиокип на одном из рудных месторождений Северного Кавказа.

1 — андезиты; 2 — туфы; 3 — медноколчеданные руды; 4 — рыхлые отложения

При измерении вертикальных H_z и горизонтальных H_p магнитных компонентов в методах ПЕМП, ДК, НП, ДИП (ДЭМП), СДВР над контактом двух сред наблюдается максимум H_p расположенный между максимумом и минимумом H_p . Над проводящей рудной жилой получают максимум H_p H_p , расположенный между максимумом и минимумом H_p , расстояние между которыми примерно равно удвоенной глубине залегания верхней кромки рудного тела (рис.4.17). По данным многочастотных и многовременных наблюдений, в индуктивных методах можно оценить электропроводность проводящих объектов, создающих магнитные аномалии.

В целом количественная интерпретация электромагнитных профилировании—процесс сложный и неточный. Поэтому имеет смысл говорить лишь о полуколичественной интерпретации, главное в которой—определение эпицентра разведываемого объекта, т.е. площади, под которой он расположен, а также оценка формы и глубины его залегания.

4.4.3 Применение методов электромагнитного профилирования

Многообразие методов профилирования, основанных на различных параметрах геологических объектов, и использование различных полей приводит к тому, что эти методы находят широкое геологическое применение.

Применение отдельных методов профилирования. Метод естественного электрического поля (ЕП или ПС) применяют:

- 1) при поисках и разведке сульфидных месторождений, антрацита, графита на глубинах до 300—500 м;
- 2) при геологическом и инженерно-геологическом картировании наносов небольшой мощности;
- 3) при выявлении мест утечек воды из рек, водохранилищ (по минимумам потенциалов) и подтока подземных вод (по максимумам потенциалов); 4) для изучения коррозии трубопроводов, других подземных металлических сооружений.

Электропрофилирование (ЭП) на постоянном и низкочастотном токе применяют для картировочно-поисковых исследований на глубинах до 500 м и, в частности, при изучении крутозалегающих пластов, слоев. Его используют:

- 1) для изучения погребенных структур (антиклиналей, синклиналей, флексур, куполов, прогибов и т. п.);
- 2) при геологическом картировании контактов и фациально-литологическом расчленении пород;
- 3) для выявления и прослеживания разрывных нарушений (сбросов, надвигов, разломов);

4) при разведке рудных (сульфидные, полиметаллические, железорудные и др.) и нерудных (угольные, кварцевые и др.) ископаемых;

5) для решения таких инженерно-геологических задач, как картирование мерзлых пород и таликов, трещиноватых и закарстованных зон, переуглубленных долин;

6) при поисках обводненных зон, пресных и минерализованных вод.

Метод вызванных потенциалов (ВП) применяют:

1) при поисках и разведке металлических руд (в частности, сульфидных), а также графита, угля;

2) для решения задач геологического картирования и расчленения геологических разрезов;

3) для выявления водонасыщенных пород, пресных и минерализованных вод, определения глубины залегания уровня подземных вод.

Метод ВП—один из эффективных методов рудной геофизики. Его используют для поисков и разведки как сплошных, так и вкрапленных и прожилково-вкрапленных руд. Однако аномалии ВП могут быть не над промышленной вкрапленностью руд, а за счет «зараженности» пород редкой вкрапленностью сульфидов, графита, угля, что затрудняет разведку перспективных залежей. В этом случае необходимо комплексировать метод ВП с другими геофизическими методами.

Методы переменного естественного электрического и магнитного поля (ПЕЭП и ПЕМП) используют главным образом для структурно-геологического картирования на глубинах до 500 м, т.е. выявления контактов, пластов, локальных объектов, зон тектонических нарушений, трещиноватости, обводненности, а также при поисках пластовых рудных и нерудных ископаемых.

Полевые индуктивные методы (НЧМ и МПП) в вариантах незаземленной петли (НП) применяют в основном для поисков и разведки хорошо проводящих массивных руд, залегающих на глубинах до 500 м. Варианты ДК и ДИП (ДЭМП) используют для геологического картирования и поисков рудных и нерудных объектов на меньшей глубине (до 100 м).

Аэроэлектроразведка низкочастотными (индуктивными) и особенно высокочастотными методами обладает меньшей глубинностью, чем те же полевые варианты. Обычно это первые десятки метров в дипольных вариантах (ДИП-А и АМПП) и первые сотни метров в ДК-А. Аэроэлектроразведку используют для геологического картирования и поисков проводящих руд.

Радиоволновые методы профилирования (СДВР, РЭМП) обладают очень малой глубинностью (до 10—30 м), и их применяют для решения задач геологического и инженерно-геологического картирования, поисков рудных и нерудных ископаемых.

Сверхвысокочастотные методы вследствие высокого скин-эффекта обладают малой глубинностью в каждой точке. Однако благодаря большой обзорности они обеспечивают достаточно высокую общую глубинность. При радиотепловой или инфракрасной съемке (РТС или ИКС) интенсивность измеренных полей зависит от тепловых и электромагнитных свойств, а также отражательной способности геологических сред, длины изучаемых радиоволн и состояния атмосферы. Наибольшее применение они находят для всепогодного картирования источников тепла; участков сейсмичности, тектонической, химической, гидротермальной активности; зон с разной влажностью и мерзлотными условиями и др.

В радиолокационных съемках (РЛС) интенсивность отраженных от земной поверхности сигналов зависит как от электрических и тепловых свойств земной поверхности, так и от ее геометрических и механических особенностей, формирующих отра-

женные сигналы. Наибольшее применение РЛС находят при картировании структурных очертаний контактов, складок, разломов, участков разной шероховатости (например, водных поверхностей, глыбового навала и т. п.). Методы РТС (ИКС) и РЛС применяют для геологического, геоморфологического, мерзлотно-гляциологического, почвенно-мелиоративного картирования.

По максимумам на графиках и картах амплитуд электромагнитных волн в пьезоэлектрических методах (ПЭМ и МСЭП) (см. п. 4.3) кроме местоположения геологических объектов с повышенными пьезоэлектрическими модулями можно оценить расстояния до них R . Для этого определяют скорость распространения упругой волны v и время прихода пьезоэлектрической (электромагнитной) волны t после возбуждения упругих колебаний. Расстояние от пункта возбуждения (ПВ) до верхней кромки пьезоэлектрического объекта $R = vt$. Получив R из разных ПВ при профильной съемке, можно оконтурить разведываемый объект. Наземный вариант ПЭМ применяют при выявлении и разведке пьезоэлектрически активных горных пород (хрусталеносных, кварцевых, пегматитовых, нефелинсодержащих и др.). К ним могут быть приурочены месторождения горного хрусталя, оптического кварца, слюды, нефелина, а также золота и некоторых рудных минералов. Глубинность разведки 10—30 м. Метод МСЭП используют при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях.

Комплексирование методов профилирования. В зависимости от глубинности, решаемых задач и особенностей геоэлектрического разреза в сочетании с зондированиями, дающими опорную информацию, применяются один-два метода профилирования. Например, для изучения верхней части (до 10—20 м) геологической среды используют методы аэроэлектроразведки ИКС (РТС), ДИП-А, РВП(СДВР-А), РЛС и полевые съемки СДВР, ДИП (ДЭМП), реже ЭП, ВП. Для малоглубинных (до 100 м) исследований в помощь геологическому, инженерно-геологическому и мерзлотному картированию и для поисков нерудных полезных ископаемых применяют воздушный и полевой варианты ДК, методы ПЕЭП, ПЕМП, ЕП, а чаще всего различные варианты ЭП.

При этом контакты разных пород, массивные пласты или изометрические объекты лучше выявляются симметричными или градиентными установками, а тонкие пласты и линзы, особенно проводящие, целесообразно разведывать трехэлектродными или дипольными установками. При более глубинном картировании (до 500 м) используют методы ПЕЭП, ЭП, ЕП. Поиски и разведку рудных полезных ископаемых на глубинах до 100 м проводят НЧМ (ДК, ДИП, НП), МПП (ДИП-МПП), ЭП, ЕП, а на глубинах до 500 м—НЧМ (НП), МПП (НП-МПП), ВП, ЕП.

Эффективность электромагнитных профилировании определяется не только наличием благоприятных геоэлектрических условий и удачным выбором метода, но и достаточным количеством дополнительной геолого-геофизической информации. В частности, в зависимости от физических свойств пород их целесообразно выполнять совместно с магниторазведкой, терморазведкой или радиометрией. Для истолкования результатов электромагнитного профилирования нужны разного рода геологические разрезы и карты, которые, в свою очередь, уточняют после постановки электромагнитного профилирования.

4.4.4 Интерпретация и области применения подземных методов электроразведки

Как отмечалось в п. 4.3, подземные методы электроразведки отличаются узкоприкладными областями применения, а интерпретация результатов направлена на решение конкретных задач: изучение объемного строения пространств между горными выработками, с одной стороны, и между ними и земной поверхностью, с другой. Теория подземной электроразведки сложнее, чем профилирование и зондирование. Все

это приводит к тому, что общих подходов к интерпретации, какие есть в методах зондирования и профилировании, здесь нет. Каждый метод отличается своими, как правило, полуколичественными, приемами интерпретации для получения конечных результатов (см. п.4.3). Эти методы относятся к разведочным и сопровождают бурение и проходку горных выработок, поэтому они теснее других опираются на разного рода геологическую информацию. Наиболее близкими к подземным методам электроразведки являются сейсмоакустические просвечивания, ядерно-физические и термические методы, с которыми их целесообразно, а иногда и необходимо комплексировать.