

Б. К. КУНЩИКОВ, М. К. КУНЩИКОВА

ОБЩИЙ КУРС
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ
РАЗВЕДКИ

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для учащихся геофизических
специальностей техникумов*



МОСКВА
«НЕДРА»
1976

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАЗВЕДКИ

Кунщикова Б. К., Кунщикова М. К. Общий курс геофизических методов разведки, М., «Недра», 1976. 429 с.

В книге изложены физические и геологические основы геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых: магниторазведки, гравитационной, электроразведки, радиометрических методов разведки, сейсморазведки, геофизических методов исследования скважин.

Приведены сведения об устройстве основных видов геофизической аппаратуры, методике и технике проведения полевых работ, камеральной обработке и интерпретации материалов. При описании аппаратуры основное внимание уделено тем приборам, которые в настоящее время нашли широкое применение.

Книга является учебным пособием для учащихся геофизических специальностей техникумов.

Табл. 13, ил. 174, список лит. — 11 назв.

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Геофизические методы разведки называют сокращенно разведочной геофизикой. Разведочная геофизика — одна из естественных наук о Земле. Ее содержанием (предметом) является изучение геологического строения земной коры, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Решение этих задач осуществляется посредством наблюдений естественных и искусственно создаваемых в толще земной коры физических полей и выявления их особенностей, обусловленных различными геологическими объектами.

В зависимости от физической сущности в разведочной геофизике выделяются следующие методы: магниторазведка, гравитационная, электроразведка, сейсморазведка, радиометрические, а также геофизические методы исследования скважин. С помощью магниторазведки изучают особенности распределения магнитного поля, вызванного горными породами и рудами различной намагниченности. Гравитационная основана на изучении поля силы тяжести и ее градиентов, отражающих плотностные неоднородности геологического разреза. Электроразведочными методами изучают процессы, происходящие в горных породах при прохождении через них электрического тока. Характер этих процессов зависит от удельного сопротивления и других электрических свойств горных пород. Радиометрические методы основаны на измерении интенсивности излучения радиоактивных элементов с целью их обнаружения и определения содержания. Методами сейсморазведки изучают особенности распространения упругих колебаний в горных породах.

Геофизические методы исследования скважин называют сокращенно каротажом. Этими методами изучают электрические, магнитные, гравитационные и другие поля в скважинах.

По условиям применения методы разведочной геофизики делятся на наземные, воздушные, морские, подземные (рудничные и скважинные).

Сведения о физических полях Земли человечество получало с глубокой древности, но практическое их изучение для познания геологических явлений началось лишь в конце прошлого века.

В 1879 г. в Швеции был сконструирован портативный магнетометр Тибергом и Таленом, а в 1881 г. — маятниковый прибор

Штернеком для измерения силы тяжести. Наиболее крупные магнитные измерения в России были проведены на Урале Д. И. Менделеевым (1899 г.), в Курской губернии Н. Д. Пильчиковым (1888 г.) и Э. Е. Лейстом (1894, 1896—1914 гг.), на Урале и в Сибири В. И. Бауманом (1914—1918 гг.). В результате были описаны крупные залежи железных руд Курской магнитной аномалии и обнаружен ряд крупных аномалий на Урале и в Сибири.

В 1914 г. немецким геофизиком Шмидтом был создан магнитометр для измерения приращения вертикальной составляющей магнитного поля. По такому же принципу в нашей стране был разработан прибор М-2, который применялся для магнитных съемок в течение ряда десятилетий.

В 1916 г. П. К. Штернбергом начаты маятниковые измерения силы тяжести с целью изучения строения земной коры в районе Москвы.

В 1896 г. венгерский физик Этвеш на основе крутильных весов Кавендиша (1798 г.) создал гравитационный вариометр для измерения горизонтальных градиентов силы тяжести.

Большой вклад в теорию сейсморазведки и практику построения сейсморазведочной аппаратуры внес основоположник научной сейсмометрии академик Б. Б. Голицын. В период 1902—1916 гг. он разработал сейсмограф, преобразующий механические колебания груза в колебания электрического тока, организовал в России сеть сейсмологических станций и предложил использовать упругие колебания от искусственных взрывов для изучения глубинного строения земной коры.

Первые работы по применению электричества относятся к середине прошлого столетия. В 1829 г. А. Фокс наблюдал над медно-колчеданными месторождениями английского графства Корнуэльс естественные поля окислительно-восстановительных потенциалов. Попытка наблюдений поля естественных потенциалов для разведки руд была сделана в 1882 г. американским ученым Барусом.

В 1912 г. французский ученый К. Шлюмберже предложил метод электроразведки постоянным током, а Н. Зундберг и К. Лундберг в Швеции в 1918 г. применили для этой цели переменный ток.

Естественная радиоактивность была открыта французским физиком Беккерелем в 1896 г., однако широкое применение этого явления для поисков радиоактивных элементов и решения задач геологического картирования было начато в 30-е годы, когда радиоактивные элементы (уран, радий и торий) стали стратегическим сырьем.

Большие перспективы для развития разведочной геофизики открылись в нашей стране после Великой Октябрьской социалистической революции.

В 1919 г. были выполнены магнитометрические и вариометрические работы по оконтуриванию Курской магнитной аномалии.

В 1923 г. В. С. Воюцкий предложил использовать для разведки отраженные упругие колебания. Первые работы по теории сейсморазведки были выполнены в 1926 г. П. П. Лазаревым и А. И. Заборовским. В дальнейшем теория и методика сейсморазведки была развита Г. А. Гамбурцевым, Ю. В. Ризниченко, И. С. Берзон, И. И. Гурвичем и другими учеными.

С 1928 г. начинают применять электрический каротаж, а в последующие годы и другие методы исследования скважин. Большой вклад в развитие теории, методики и истолкования электрического каротажа внесли С. Г. Комаров, В. Н. Дахнов, В. А. Фок, Л. М. Альпин, А. И. Заборовский, А. С. Семенов и другие ученые. В 1934 г. В. А. Шпак, Г. В. Горшков и А. Н. Граммаков разработали методы радиоактивного каротажа, М. И. Бальзамов — метод газового каротажа.

В 1936 г. А. А. Логачевым был сконструирован первый в нашей стране аэромагнитометр.

В Геофизическом институте АН СССР под руководством Г. А. Гамбурцева в период с 1938 по 1955 г. были созданы корреляционный метод преломленных волн (КМПВ) и глубинное сейсмондирование (ГСЗ).

В последние годы широкое развитие получили методы электроразведки на переменном токе, а в сейсморазведке — промежуточная магнитная запись в двоично-цифровом коде, предназначенная для ввода в ЭВМ с целью автоматизации процесса обработки и наиболее полного анализа полученных данных. Аналогичная аппаратура применяется при аэрогеофизических и скважинных работах.

Геофизические методы стали неотъемлемой частью при геологическом картировании, поисках и разведке полезных ископаемых, а также при решении инженерно-геологических и гидрогеологических задач. Применение геофизических методов позволяет решать геологические задачи наиболее эффективно, быстро и с малыми затратами.

§ 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И АНОМАЛИИ

Под физическим полем понимают пространство, каждая точка которого может быть охарактеризована некоторой величиной постоянного или меняющегося значения. Эти величины могут быть скалярами или векторами, а их поля соответственно скалярными и векторными. Если в некоторый момент времени модуль и направление физической величины во всех точках некоторого пространства или направления одинаковы, то поле называют однородным в этом пространстве или направлении. Если модуль и направление (вместе или отдельно) меняются от одной точки поля к другой, то такое поле называется неоднородным.

Если модуль и направление физической величины в каждой точке пространства в течение длительного времени остаются

неизменными, то такое поле называют постоянным, в противном случае поле будет переменным. В зависимости от характера (закона) изменения физической величины поля его называют гармоническим (величина меняется по закону синуса или косинуса), импульсно-периодическим, а периодическим и т. д. Различают изотропное и анизотропное однородные поля. Изотропное поле однородно по любому направлению. Анизотропное поле однородно лишь по некоторым направлениям, обычно по двум. Зависимость физических свойств вещества от направления носит название анизотропии.

В разведочной геофизике изучают естественные и искусственно созданные физические поля. К естественным относятся гравитационное, магнитное, некоторые виды электрических полей, поле распределения радиоактивности. В их создании человек не принимает участия. Искусственным путем создаются постоянное или переменное электромагнитное поле, поле распространения упругих колебаний, поле распределения искусственной радиоактивности. Искусственное электромагнитное поле может быть создано гальваническим или индуктивным способами.

В гальваническом способе через два заземленных электрода пропускают постоянный или переменный электрический ток. В индуктивном способе переменный электрический ток пропускают через генераторную антенну, которая излучает распространяющееся в горных породах переменное электромагнитное поле.

Поля упругих колебаний создают с помощью взрывов, ударов тяжелых предметов о земную поверхность и специальных источников гармонических или импульсно-периодических упругих колебаний.

Поля искусственной радиоактивности создают в горных породах путем действия на них гамма- или нейтронного излучения. Физические поля, которые изучают в разведочной геофизике, делятся на потенциальные (гравитационное, магнитное, электромагнитное) и поля распределений (упругих колебаний, радиоактивности).

Основными характеристиками потенциального поля являются напряженность E и потенциал U . Под напряженностью понимают силу F , с которой поле действует на единицу положительного заряда q , магнитной массы m_m или обычной массы m , внесенных соответственно в электрическое, магнитное или гравитационное поле:

$$\bar{E}_э = \frac{F_э}{q}, \quad \bar{E}_m = \frac{F_m}{m_m},$$

$$\bar{E}_г = \frac{F_г}{m}.$$

Напряженность поля — векторная величина. Если источник поля точечный, то направление вектора \bar{E} в данной точке поля

совпадает с линией, соединяющей источник и данную точку. Напряженность поля точечного источника убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от него. На бесконечно далеком расстоянии от источника напряженность поля равна нулю. Если поле создается несколькими источниками, то напряженность этого поля равна векторной сумме напряженностей, создаваемых в данной точке каждым источником в отдельности. В этом выражается важный для разведочной геофизики принцип суперпозиции (наложения) полей отдельных источников.

Потенциальное поле часто изображают в виде линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности. В электрическом и магнитном полях линии

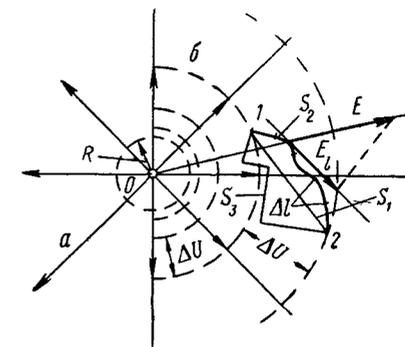


Рис. 1. Изображение поля точечного источника в однородной среде в виде линий вектора напряженности (а) и эквипотенциальных поверхностей (б)

направлены от положительных источников к отрицательным, а в гравитационном поле — из бесконечности к источнику этого поля. Такие линии получили название линий вектора напряженности.

Поле точечного источника O в однородной среде имеет вид линий, направленных по радиусам равномерно во всех направлениях (рис. 1). Если через сферу радиуса R и с центром в источнике O проходят N линий, то число их, приходящееся на единицу поверхности сферы (плотность линий) равно $N/4\pi R^2$, т. е. пропорционально напряженности. Эта пропорциональность сохраняется в полях и других по форме источников, поэтому по плотности и направлению этих линий можно судить о величине и направлении вектора напряженности.

Величина работы ΔA по перемещению единичной массы или заряда на элементарном отрезке Δl (рис. 1), который можно считать прямолинейным, равна

$$\Delta A = E_t \Delta l,$$

где E_t — составляющая вектора напряженности по направлению касательной кривой на отрезке Δl .

Работа по перемещению единичной массы или заряда из точки 1 в точку 2 равна сумме величин ΔA на всех n элементарных

отрезках Δl , расположенных между точками 1 и 2 по некоторой траектории перемещения S :

$$A = E_{l_1} \Delta l_1 + E_{l_2} \Delta l_2 + \dots + E_{l_n} \Delta l_n.$$

Траектория S , по которой перемещается заряд или единичная масса, может быть различной: прямолинейной S_1 , криволинейной S_2 , ломаной S_3 и т. д. Если величина работы ΔA не зависит от траектории S , то такое поле является потенциальным. В каждой точке оно характеризуется скалярной величиной — потенциалом U , под которым подразумевают работу по перемещению единичной массы или заряда из бесконечности в данную точку поля. Напряженность потенциального поля в данной точке равна градиенту потенциала (изменению потенциала U на единицу длины) в этой точке, взятому с обратным знаком:

$$E = -\text{grad } U.$$

Частная производная потенциала U по любому направлению S равна составляющей вектора напряженности U по этому направлению:

$$E_S = -\frac{\partial U}{\partial S}.$$

Если потенциал поля выразить через функцию от координат x , y и z и приравнять ее к постоянной величине C , то получим уравнение поверхности равного потенциала

$$U(x, y, z) = C,$$

которую называют эквипотенциальной поверхностью.

Придавая постоянной C различные значения, получим семейство поверхностей равного потенциала, заполняющих поле. Если построить несколько эквипотенциальных поверхностей, отличающихся на одну и ту же величину ΔU , тогда величина среднего градиента будет большей там, где расстояние Δh между поверхностями мало, и меньшей в тех местах, где это расстояние велико.

Таким образом, эквипотенциальные поверхности сближаются в областях поля с большей напряженностью и расходятся в областях с малой напряженностью. Линии вектора напряженности направлены по нормали к эквипотенциальным поверхностям. Поэтому, потенциальное поле можно изображать как в виде линий вектора напряженности, так и в виде эквипотенциальных поверхностей.

Физическое поле, особенности которого зависят от геологического строения земной коры, называется геофизическим.

Между геологическим и геофизическим полями существует прямое соответствие, так как они отражают одну объективную реальность — один и тот же участок земной коры. Поэтому

определенному геологическому полю соответствует определенное геофизическое поле. На этом принципиальном положении основывается один из важнейших этапов применения геофизических методов — интерпретация наблюдаемых геофизических полей (геологическая расшифровка геофизических данных).

В разведочной геофизике различают нормальное и аномальное геофизические поля. Нормальное поле в простейшем случае — это однородное геофизическое поле, отвечающее однородной геологической среде. В более сложном случае нормальное поле может быть и неоднородным, если создающая его геологическая среда сложена толщей разновозрастных (или однотипных), но неоднородных по физическим свойствам пород. В общем случае под нормальным полем понимают поле крупной геологической структуры или целого геологического региона (а в магнито- и гравиразведке — соответствующее поле всей Земли) по отношению к полю, создаваемому более мелкой структурой.

Поля, обязанные локальным геологическим объектам — пластам, жилам, интрузиям, рудным телам и т. д., называются аномальными (или аномалиями). Следовательно, в сложных геологических условиях наблюдаемое геофизическое поле складывается из нормального и аномального полей. И для выделения аномального поля необходимо из поля наблюдаемого вычесть нормальное поле.

Понятия «нормальное» и «аномальное» применимы также к геологическому полю. Примером нормального геологического поля может служить большой массив литологически однородных горных пород. К аномальному геологическому полю можно отнести локальные неоднородности массива, контакты разнородных по составу горных пород, тектонические нарушения. Во многих случаях аномальные участки геологического поля характеризуются резким изменением физических параметров, поэтому такие участки являются причинами аномальных геофизических полей.

Геофизические поля условно разделяются на поля и информативные и поля-помехи. К информативным относятся поля, отражающие влияние геологических объектов, которые необходимо выявить геофизическими методами. К помехам относятся поля, вызванные такими объектами, которые для данных исследований не представляют практического интереса.

В каждом геофизическом методе в зависимости от области его применения существуют свои поля-помехи, с которыми ведется борьба путем их подавления или аналитического учета по результатам комплекса геофизических и геологических исследований. В некоторых случаях из-за большой величины помех геофизические исследования вообще не выполняются.

В разведочной геофизике изучают распределение поля на некоторой поверхности или по определенным направлениям. Большинство геофизических полей обычно непрерывны, т. е. физические величины, характеризующие поле, плавно меняются от одной точки к другой. В этом состоит одно из существенных отличий

геофизического поля от геологического, которое очень редко бывает непрерывным, а чаще всего резко изменяется на контактах различных по составу или происхождению геологических образований. Чтобы составить полное представление о физической величине поля, необходимо знать ее значение в каждой точке поля. Поскольку она непрерывна, число таких точек будет бесконечным, поэтому изображения их не представляется возможным. Практически для изображения поля пользуются его величинами в отдельных точках, т. е. дискретной формой изображения. Густота точек выбирается таким

ссылают около каждой из них значение поля, а потом равные значения соединяют плавными линиями. Разница в значениях двух соседних изолиний называется сечением изолиний.

Геофизические поля наблюдают с помощью специальных приборов. Основным узлом геофизического прибора является чувствительный элемент — датчик, реагирующий на воздействие той или иной величины. Показания датчика передаются в измерительную схему обычно в виде электрического или другого сигнала, который на выходе схемы может быть зафиксирован визуально по отклонению стрелки прибора или светового блика или записан на ленте регистрирующего прибора.

В разведочной геофизике измеряют или полное значение физической величины (модуль и вектор), или ее приращение по отношению к полю в какой-либо выбранной точке.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

Характер геофизических полей определяется петрофизическими характеристиками горных пород, т. е. физическими свойствами различных петрографических разновидностей. Различие горных пород по физическим свойствам — необходимое условие возникновения аномалий геофизического поля.

Физические свойства горных пород, обусловленные составом и строением, являются постоянными при определенных условиях и закономерно меняются с изменением состава и структуры. Основное влияние на структуру геофизических полей оказывают магнитная восприимчивость и остаточное намагничение, плотность, удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая и магнитная проницаемости, поляризуемость, скорость распространения упругих волн, теплопроводность, радиоактивность.

Магнитная восприимчивость χ характеризует способность горных пород к намагничению под воздействием внешнего магнитного поля. Намагниченность \bar{J} — векторная величина. Она характеризует способность горных пород к созданию магнитного поля и численно равна магнитному моменту M единицы объема V :

$$\bar{J} = \frac{\bar{M}}{V}.$$

Магнитные восприимчивость и намагниченность измеряются в единицах СГС.

Горные породы под воздействием напряженности \bar{T} земного магнитного поля приобретают индукционную (наведенную) намагниченность

$$\bar{J}_i = \bar{T} \chi \frac{1}{1 + \chi N},$$

где N — коэффициент размагничения.

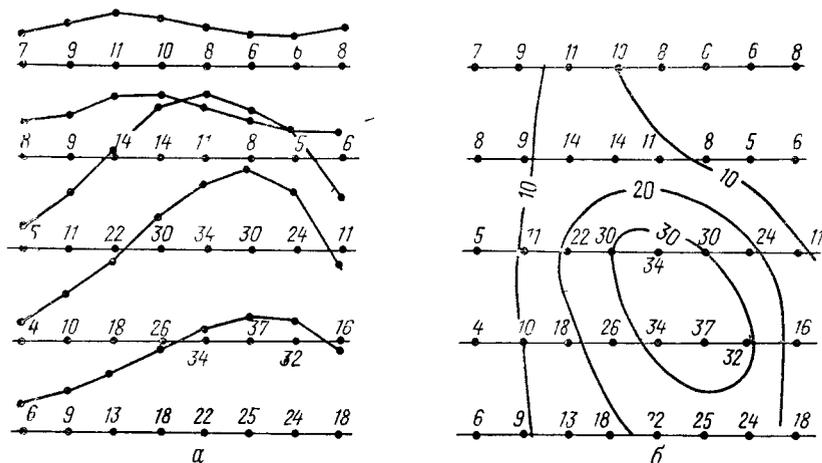


Рис 2. Изображение поля физической величины в виде плана графиков (а) и изолиний (б)

образом, чтобы между двумя соседними точками изображаемая физическая величина изменялась бы по прямолинейному закону.

Простейшей формой изображения поля является таблица его значений в точках по участку или направлению. Но табличная форма изображения лишена наглядности. Поэтому она применяется лишь как промежуточная форма. Поле физической величины вдоль направления изображают обычно в виде графика. К графическим относятся способы изолиний (на плоскости) и изоповерхностей (в пространстве), линий векторов, числовых полей.

Для изображения поля на какой-либо поверхности применяют план графиков (рис. 2, а) или план изолиний (рис. 2, б) физической величины. Для построения плана графиков на план наносят положение точек наблюдения в заданном линейном масштабе и линии профилей используют как оси абсцисс графиков наблюденой величины. План изолиний представляет собой совокупность линий, проведенных через точки с равными значениями физической величины. Для его построения точки, в которых известна физическая величина, выносят на план, выпи-

Таблица 1

Сущность явления размагничивания состоит в том, что внутри тела создается магнитное поле, направленное противоположно намагничивающему, поэтому намагниченность тела уменьшается. Величина N зависит от формы тела и направления вектора \vec{T} . Для тонкого пласта, плоскость которого нормальна вектору \vec{T} , коэффициент размагничивания имеет максимальное значение, равное 4π , а для тонкого длинного цилиндра, параллельного вектору \vec{T} , $N = 0$.

Под влиянием размагничивания вектор \vec{J}_i отклоняется от направления намагничивающего поля в сторону длинной оси тела.

Влияние коэффициента размагничивания становится заметным лишь для горных пород с высокой магнитной восприимчивостью ($\kappa > 0,01$ ед. СГС). Для тела сферической формы ($N = 4/3\pi$) при $\kappa < 0,01$ ед. СГС уменьшение модуля \vec{J}_i вследствие размагничивания не превышает 9—10%. Поэтому для горных пород небольшой магнитной восприимчивости $\vec{J}_i \approx \vec{T}\kappa$.

При намагничивании горных пород во время их остывания в слабом магнитном поле и в других случаях возникает намагниченность, которая сохраняется после снятия поля. Она получила название остаточной намагниченности \vec{J}_r . Предполагают, что она возникла под влиянием температурных изменений в процессе образования горных пород. Вектор остаточной намагниченности часто отклоняется от направления \vec{T} , и это отклонение не остается постоянным для пород различного возраста. Поэтому предполагают, что положение магнитного полюса Земли изменялось в различные геологические эпохи. Суммарная намагниченность тела \vec{J}_s определяется геометрической суммой векторов \vec{J}_i и \vec{J}_r :

$$\vec{J}_s = \vec{J}_i + \vec{J}_r.$$

Магнитная восприимчивость изменяется в зависимости от минералогического и химического составов, структуры горных пород. Минералы делятся на ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные. В табл. 1 приведена магнитная восприимчивость ферромагнитных и парамагнитных минералов.

Наибольшее влияние на величину магнитной восприимчивости оказывает присутствие в них магнетита. С увеличением содержания магнетита магнитная восприимчивость горных пород повышается. Для интрузивных пород с содержанием магнетита более 0,1% между величинами κ и C наблюдается прямая корреляционная зависимость. При $C \leq 0,1\%$ такой зависимости не наблюдается. В этом случае на величину магнитной восприимчивости влияют размер, форма и структура включений магнетита.

При возрастании размеров зерен магнетита или его включений в виде цементирующей массы магнитная восприимчивость повышается. Если зерна магнетита небольшие и расположены

Минералы	$\kappa \cdot 10^6$, ед. СГС	Минералы	$\kappa \cdot 10^6$, ед. СГС
Ферромагнитные:		пирит	7—159
магнетит	$3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	халькопирит . . .	0—8
титаномагнетит	$3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	пльменит	113—271
маггемит	$3 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$	Парамагнитные, со-	
пирротин	$10^9 - 10^4$	держателе марганец	
гематит	10—200	в химической форму-	
Парамагнитные, со-		муле:	
держателе железо в		родохрозит	100—138
химической форму-		браунит	120—145
ле:		Парамагнитные, не со-	
авгит	13—133	держателе железа в	
эгирин	0—85	химической форму-	
роговая обманка	16—22	ле:	
биотит	23—116	плагноклаз	0—7
хлорит	8—106	диоксид	7—10
сидерит	7—102	флогопит	5—8
эпидот	0—24	мусковит	1—6
		доломит	1—3

Таблица 2

Горные породы	$\kappa \cdot 10^6$, ед. СГС	Горные породы	$\kappa \cdot 10^6$, ед. СГС
Интрузивные:		Эффузивные:	
гранит	0—300	порфир	0—300
гранодиорит	0—300,	андезит	0—300
	700—1500	порфирит	700—3000
диорит	0—300,	базальт	300—1500,
	1500—3000		6000—12000
габбро	0—300,	диабаз	0—300,
	1500—6000		700—1500
пироксенит	12000—20000		

изолированно, то это ведет к уменьшению магнитной восприимчивости. В табл. 2 приведены величины магнитной восприимчивости, которые встречаются наиболее часто.

Для интрузивных пород содержание магнетита постепенно повышается от кислого состава к основному. Аналогично изменяется и величина магнитной восприимчивости. В группе ультраосновных пород величина магнитной восприимчивости во многом определяется наличием в них титаномагнетита. Пирротин встречается в основном в сульфидных месторождениях, а гематит в месторождениях сульфидных и железных руд. Осадочные горные породы практически не содержат ферромагнитных минералов, поэтому магнитная восприимчивость их весьма низкая.

Магнитная восприимчивость парамагнитных минералов обусловлена в основном содержанием в них железа, марганца и титана. Некоторое повышение магнитности диоксида, флогопита и мусковита объясняется незначительной механической или изоморфной примесью железа.

Диамагнитные минералы (кварц, ортоклаз, гиперстен, кальцит, барит и другие) имеют весьма низкую и отрицательную $[(0,3-1) \cdot 10^{-6}$ ед. СГС] магнитную восприимчивость. Магнитная восприимчивость осадочных и некоторых эффузивных горных пород, не содержащих ферромагнитных минералов, изменяется от 0 до $70 \cdot 10^{-6}$ ед. СГС.

Остаточная намагниченность пород статистически пропорциональна магнитной восприимчивости, но в конкретных геологических условиях могут быть отклонения от этого правила. Для относительной характеристики таких отклонений в магнито-разведке рассматривают параметр Q , равный отношению остаточной намагниченности к наведенной. Он характеризует условия, в которых происходило палеонамагничивание.

Плотность σ горных пород — это их масса в единице объема. Единицей измерения плотности является $г/см^3$. Величина плотности зависит в основном от минералогического состава и общей пористости. Плотность некоторых минералов приведена в табл. 3.

Таблица 3

Минералы	σ , г/см ³	Минералы	σ , г/см ³
Кварц	2,58—2,66	Доломит	2,80—2,90
Плагиоклаз	2,61—2,76	Сидерит	3,70—4,00
Ортоклаз	2,54—2,60	Эпидот	3,10—3,50
Микроклин	2,61—2,65	Сфалерит	3,95—4,00
Пироксен	2,80—3,70	Халькопирит	4,10—4,30
Амфибол	3,00—3,50	Барит	4,20—4,60
Слюда	2,78—3,08	Гематит	5,0—5,20
Хлорит	2,60—3,00	Магнетит	5,0—5,20
Кальцит	2,60—2,70	Пирит	5,05—5,10
Магнезит	3,00—3,20		

Большие пределы изменения плотности плагиоклазов, пироксенов, амфиболов и хлоритов определяются их химическим составом. В пределах этих групп наблюдается корреляционная связь между плотностью и относительной молекулярной массой. График зависимости имеет тенденцию к выполаживанию по мере увеличения молекулярной массы m групп минералов (рис. 3).

Общая пористость горной породы — это отношение объема ее пор к объему минерального скелета. Средняя пористость интрузивных пород составляет 1—3%, а эффузивных 3—5%. Пористость осадочных пород значительно выше (20—40%).

Максимальную плотность имеют интрузивные породы (табл. 4), несколько меньшую — эффузивные и самую низкую — высокопористые осадочные породы (глины, песчаники, алевролиты). В изверженных горных породах наблюдается постепенное повышение плотности от кислых разновидностей к основным, поскольку в этом же направлении растет содержание тяжелых темноцветных минералов.

Высокую плотность имеют рудные минералы, поэтому плотность горных пород, содержащих рудную минерализацию, также повышается. В высокопористых эффузивных породах плотность

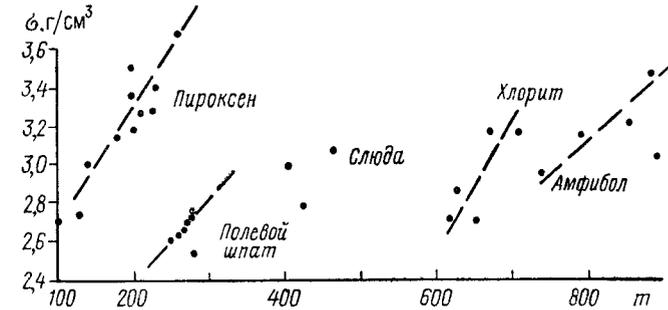


Рис. 3. Зависимость плотности минералов от относительной молекулярной массы

повышается при водонасыщении пор. В осадочных породах (глинах, песчаниках) при увеличении водонасыщенности увеличивается их объем, а при уменьшении водонасыщенности объем уменьшается, поэтому плотность мало меняется.

Таблица 4

Горные породы	σ , г/см ³	Горные породы	σ , г/см ³
Интрузивные:		Осадочные:	
гранит	2,58—2,63	глина, аргиллит	2,0—2,4
гранодиорит	2,63—2,70	песок, алевролит	2,00—2,42
диорит	2,76—2,84	песчаник	2,10—2,80
габбро	2,85—3,20	мергель	2,00—2,60
пироксенит	2,90—3,30	известняк, доломит	2,10—2,90
перидотит	2,88—3,35	Полезные ископаемые:	
Эффузивные:		руды железные, медные, хромиты, полиметаллы	3,50—5,50
липарит	2,14—2,59	ископаемые угли	1,30—1,45
кварцевый порфир	2,59—2,70	каменная соль	2,10—2,30
андезит	2,17—2,68	корунд	3,50—3,70
порфирит	2,55—2,81	нефть	0,85—1,00
базальт, диабаз	2,62—2,95	вода	1,00

Таблица 5

Минералы, горные породы	ρ , Ом·м	Минералы, горные породы	ρ , Ом·м
Металл, графит, антрацит, пирротин, пирит, галенит	$10^{-4}-10^{-2}$	Метаморфические: сухая	10^3-10^7
Гематит, ильменит, пиролюзит, халькозин	$10^{-2}-10^2$	влажная	$10-10^3$
Силикатный породообразующий минерал	10^3-10^{12}	Осадочные, насыщенные пресной и слабо соленой водой:	
Кварц, слюда, флюорит	10^{16}	глина	10-100
Вода с растворенной в ней NaCl (0,1 г/л)	60	аргиллит	20-200
То же, (100 г/л)	0,1	песчаник рыхлый	30-200
Дождевая вода	100	песчаник плотный	100-1000
Нефть	10^8-10^7	известняк	100-10 ⁵
Интрузивные:		гипс	10^5-10^6
сухая	10^6-10^7	Осадочные, насыщенные соленой водой:	
влажная	$10-10^3$	глина	1-10
Эффузивные:		аргиллит	1-20
сухая	10^4-10^6	песчаник рыхлый	1-10
влажная	$10-10^3$	песчаник плотный	5-100
		известняк	$100-10^5$
		гипс	10^5-10^6

Удельное электрическое сопротивление ρ является основным параметром, влияющим на распределение в горных породах электрического тока. Сопротивление R проводника длиной l и поперечным сечением S определяется формулой

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

откуда следует, что

$$\rho = RS / l.$$

Удельное сопротивление¹ горной породы численно равно сопротивлению изготовленного из нее куба со стороной 1 м. Обратная удельному сопротивлению величина $\gamma = 1/\rho$ называется удельной электропроводностью. Единицей измерения γ является См/м или См/см.

Удельное сопротивление зависит от минералогического состава, водонасыщенности пор и концентрации солей в растворе, насыщающем поры.

По характеру электропроводности минералы делят на хорошо проводящие ($10^{-4}-10^{-2}$ Ом·м), полупроводники (10^3-10^{12} Ом·м) и изоляторы (10^{16} Ом·м). В табл. 5 приведены величины удельных сопротивлений минералов и горных пород.

¹ Для простоты изложения слово «электрическое» здесь и далее опущено.

Хорошо проводящими минералами являются графит, антрацит, а также многие рудные минералы меди, железа, марганца и ряда других элементов. К изоляторам относятся кварц, слюды, флюорит и многие силикатные породообразующие минералы. Большинство рудных минералов (сульфидные, окисные минералы железа, меди и других металлов) относятся к полупроводникам.

Большую роль в формировании электрических свойств пород и руд играет вода, являющаяся ионным проводником. Удельное сопротивление воды зависит от состава и концентрации растворенных в ней солей. Даже пресная дождевая вода, которая практически не содержит солей, имеет хорошую проводимость, возрастающую по мере увеличения насыщенности раствора. При одной и той же концентрации, растворы KCl снижают удельное сопротивление более значительно, чем растворы NaCl. На электропроводность минерализованной воды влияет ее температура. При изменении ее от 18 до 100° С удельное сопротивление раствора понижается в три раза. Высокое удельное сопротивление имеет нефть.

Горную породу можно уподобить агрегату из зерен минералов, в порах между которыми находится электролит. Если зерна имеют хорошую проводимость, то удельное сопротивление такой породы определяется электропроводностью минералов и находящейся в порах минерализованной воды. Среди геологических образований к этой категории относятся руды меди, свинца, цинка и других металлов. Но так как большинство породообразующих минералов обладают значительным сопротивлением, то электрический ток в горных породах течет только через электролит, находящийся в их порах. Следовательно, электропроводность горных пород имеет существенно ионную природу, зависит от пористости и влажности пород, а также от минерализации воды. Поэтому в целом плотные, массивные интрузивные породы характеризуются высокими значениями сопротивления, осадочные породы, как более рыхлые и пористые — более низкими сопротивлениями. Среди терригенных пород глины имеют наименьшие значения сопротивления вследствие высокой влажности.

У рассланцованных и трещиноватых горных пород наблюдается анизотропия электропроводности. Она заключается в том, что удельное сопротивление ρ_n , измеренное при пропускании тока по нормали к слоистости или трещиноватости, больше удельного сопротивления ρ_t , измеренного вдоль напластования. Коэффициент

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

называют коэффициентом анизотропии. Он колеблется от 1 до 3. Нижний предел относится к горным породам, где

слоистость отсутствует, а трещины распределены хаотически в разных направлениях. Породы, для которых $\lambda = 1-1,05$, называют изотропными. Горные породы, для которых $\lambda > 1$, называют анизотропными. К ним относятся прежде всего графитовые и углистые сланцы, для которых коэффициент λ достигает верхнего предела. В трещиноватых скальных горных породах величина λ достигает 2—2,5.

В методах электроразведки на переменном токе с частотой более 10^4 Гц особенности распространения электромагнитного поля определяются не только удельным сопротивлением, но и диэлектрической проницаемостью горных пород. Она характеризует способность вещества к поляризации под влиянием переменного электромагнитного поля.

Различают абсолютную и относительную проницаемости. Абсолютная проницаемость определяет емкость конденсатора, между обкладками которого помещено испытуемое вещество. Для разведочной геофизики практическое значение имеет относительная диэлектрическая проницаемость ϵ . Она показывает, во сколько раз увеличится емкость конденсатора, если между его обкладками вместо воздушного зазора поместить вещество горной породы. Вода имеет максимальную величину относительной диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость воды при температуре 20°C равна 70, а при нагревании до 100°C убывает до 55.

Диэлектрическая проницаемость горных пород определяется их влагонасыщенностью и, следовательно, пористостью. У низкопористых изверженных горных пород в зависимости от их влажности величина относительной диэлектрической проницаемости колеблется от 7 до 19. Диэлектрическая проницаемость высокопористых осадочных пород меняется от 2—3 (сухие породы) до 40 (влажные породы).

На распространение электромагнитного поля частотой выше 10 кГц влияет магнитная проницаемость μ , которая характеризует способность вещества концентрировать силовые линии магнитного поля. Практическое значение для разведочной геофизики имеет относительная магнитная проницаемость, показывающая во сколько раз магнитная индукция поля, созданная током в горной породе, превышает эту величину, наблюдаемую в воздухе. Относительная магнитная проницаемость ферромагнитных минералов достигает нескольких десятков единиц. Горные породы с вкрапленностью ферромагнитных минералов имеют величину $\mu = 2-10$. Для остальных минералов и большинства горных пород она равна единице.

При длительном пропускании через электронно- или ионно-проводящую среду электрического тока она поляризуется настолько, что после выключения тока в ней протекает вторичный ток, обусловленный потенциалами вызванной поляризации $U_{ВП}$ (см. § 43). Интенсивность вызванной поляризации η характеризуется удель-

ной поляризуемостью, которая определяется по формуле

$$\eta = \frac{\Delta U_{ВП}}{\Delta U} \cdot 100,$$

где ΔU — разность потенциалов, измеренная в среде при пропускании через нее тока; $\Delta U_{ВП}$ — разность потенциалов вызванной поляризации, измеренной через 0,5 с после выключения тока.

Основное влияние на величину удельной поляризуемости оказывает содержание в горной породе сульфидов, графита, магнетита и других электронно-проводящих минералов. Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что

$$\eta = \frac{C_s}{\alpha + C_s} \cdot 100,$$

где C_s — объемное содержание в породе электронно-проводящих минералов; α — коэффициент, зависящий от состава, структуры горной породы и других причин.

Для вкрапленников сульфидов $\alpha \approx 0,4$. С увеличением C_s коэффициент α уменьшается. Для агрегата, сложенного сплошь электронно-проводящими минералами, удельная поляризуемость достигает 40—60%. При незначительном содержании C_s большое влияние на удельную поляризуемость оказывает распределение электронно-проводящих минералов в породе, а также текстурные и другие факторы, определяющие ионную поляризуемость. При наличии равномерной и тонкорассеянной вкрапленности сульфидов содержанием 1—2% величина η может достигать 10—15%, в то время как прожилковая или гнездообразная вкрапленность такого же содержания может практически не сказаться на увеличении удельной поляризуемости. Повышенная поляризуемость (10—15% и более) наблюдается у магнетита, серпентинита, углито-графитизированных пород, а также у осадочных и выветрелых железистых пород. В горных породах, не содержащих электронно-проводящих минералов, величина η не превышает 0,5—2,5%.

В реальных геологических средах, которые приближенно можно рассматривать как упругие, скорость распространения волн различна.

В табл. 6 приведены скорости v распространения упругих волн в различных горных породах.

Рыхлые высокопористые горные породы имеют более низкую скорость. Ее величина зависит от соотношения твердой, жидкой и газообразной фаз, где скорость имеет резко различные величины. В сухих и малообводненных рыхлых породах скорость меньше, чем в воздухе.

Величина скорости v_s уменьшается по мере увеличения пористости и уменьшения v_p . Это вызвано тем, что при разрыхлении горных пород уменьшается сцепление частиц, что ведет к уменьшению упругой деформации сдвига.

Таблица 6

Горные породы	$v, \text{ м/с}$
Гранит, сиенит	4000—6000
Габбро	6500—7000
Диабаз, базальт	5400—6600
Известняк, мрамор, доломит	5000—6000
Песчаник	3000—5000
Мергель, выветрелый известняк	2000—3000
Глина, глинистый сланец	2000—2400
Влажный песок	1500—1600
Сухой песок	100—1000
Почва	100—200
Вода	1400—1600
Лед	3500—3800
Нефть	1400—1900
Воздух	310—360

Характер распространения упругих колебаний определяется волновым сопротивлением $\gamma = v\sigma$. На границах слоев различного волнового сопротивления резко меняется направление распространения и интенсивность упругих волн.

Как показывают данные табл. 6, скорость распространения упругих волн мало зависит от состава пород, но в большой степени зависит от их уплотненности и влажности. Плотные неизменяемые интрузивные породы (граниты, габбро, диабазы), характеризующиеся низкой пористостью, отличаются наиболее высокими значениями скоростей (4000—7000 м/с).

Рыхлые высокопористые горные породы (песчаники, мергели, глины) характеризуются более низкими значениями скоростей распространения упругих волн.

Скорость распространения волн в сухих и малообводненных рыхлых породах меньше, чем во влажных.

Следует отметить, что скорость распространения упругих волн в горных породах с увеличением глубин их залегания увеличивается, что связано с уплотнением пород.

В термическом методе разведки измеряют распределение температуры слоев горных пород, пересеченных скважинами. Нагрев горных пород происходит за счет теплового потока, идущего из глубин Земли к ее поверхности. Наблюдаемая температура зависит от теплопроводности горной породы — процесса распространения теплоты от более нагретых элементов ее к менее нагретым, приводящего к выравниванию температур. Согласно основному закону теплопроводности, вектор плотности теплового потока \bar{Q} пропорционален градиенту температуры t :

$$\bar{Q} = -\lambda \text{ grad } t,$$

где λ — коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·°С.

Таблица 7

Минералы, горные породы и другие среды	$\lambda, \text{ ккал/м ч } ^\circ\text{С}$	Минералы, горные породы и другие среды	$\lambda, \text{ ккал/м ч } ^\circ\text{С}$
Воздух	0,02	Диорит	1,8—2,1
Вода	0,503	Габбро	1,73
Нефть	0,12	Андезит	1,1
Кварц	2,15	Базальт	1,5—1,7
Бронзит	4	Диабаз	1,91
Магнетит	10,8	Известняк	1,3—1,8
Сфалерит	14,4	Песчаник	1,1—2,6
Каменная соль	6,2	Глинистый сланец	1,3—1,9
Гранит	2,1—3,1	Глина	0,86

Коэффициент λ определяет количество тепла, перенесенного горной породой в течение часа на расстояние 1 м при изменении температуры на 1° С. В табл. 7 приведены значения λ для различных минералов, горных пород и других сред.

Наиболее низкую теплопроводность имеют жидкие и газообразные вещества, а высокую — рудные минералы и каменная соль.

Теплопроводность горных пород зависит от их минералогического состава, соотношений твердой, жидкой и газообразной фаз и пористости. Интрузивные низкопористые породы имеют несколько повышенную величину λ , эффузивные высокопористые породы — пониженную за счет влияния в породах воздуха и жидкости.

Радиоактивность — это способность некоторых атомных ядер самопроизвольно превращаться в ядра с иными физическими и химическими свойствами.

Радиоактивное превращение всегда сопровождается выделением значительного количества энергии и поэтому в естественных условиях является необратимым процессом. Основной вклад в радиоактивность горных пород вносят уран, торий, калий и продукты их распада (табл. 8).

В изверженных породах уран концентрируется в виде изоморфной примеси в акцессорных минералах ториево-редкоземельной группы, в рассеянной форме в породообразующих минералах и в виде собственных минералов.

Уран образует месторождения в пегматитах, кварцевых жилах и грейзенах, гидротермальные в изверженных породах кислого и щелочного состава; осадочные в песчаниках, битумах, фосфоритах, углях, нефти. В пегматитах минералы урана представлены уранофаном, уранинитом, браннеритом, тухолитом, пирохлором. В гидротермальных месторождениях главными минералами являются настуран, уранинит, уранофан. В зоне окисления гидротермальных месторождений развиты уранофан, отенит, торбернит, шинколовит, прекингиригит. В кварцевых жилах, грейзенах и ураноносных конгломератах часто присутствует браннерит.

Таблица 8

Горные породы	$C_U \cdot 10^4, \%$	$C_{Th} \cdot 10^4, \%$	$C_K, \%$
Изверженные:			
щелочные	0,3—89	5—80	2,5
кислые	3,5	18	3,34
средние	1,8	7	2,31
основные	0,5	3	0,83
ультраосновные	0,03	0,05	0,03
Осадочные:			
карбонатные	2,2	1—2,4	0,26
сланец	3,2—4,2	12	0,7—3,2
глина	4,1	11	2,28
песчаник	2	6—30	1,1—3
Метаморфические:			
мрамор	0,17	0,03	—
филлит	1,9	5,5	—
кристаллический сланец	2,5	7,5	—
гранулит	4,9	12,2	—

В осадочных месторождениях уран встречается в виде коффинита, настурана, тьюмунита.

Среди осадочных пород повышенными концентрациями урана и тория выделяются морские фосфориты [(50—300) · 10⁻⁴%], некоторые черные сланцы (до 100 · 10⁻⁴%), костные остатки рыб и бурые угли.

Основные ториевые минералы монацит, циркон и торий встречаются в пегматитах, грейзенах, гранитогнейсах, кислых и щелочных породах совместно с цирконом, бериллом. Монацит и циркон в результате выветривания месторождений и рудопроявлений часто образуют россыпи.

Калий содержится во многих породообразующих минералах, особенно в кислых и щелочных изверженных породах. Радиоактивность обусловлена изотопом калий-40, которого в породах содержится 0,012%.

Радиоактивные элементы в виде растворимых солей урана, радия и газообразного радона находятся в природных водах. Наибольшая концентрация их наблюдается в воде океанов, морей, рек и озер (10⁻¹³—10⁻¹²% радия и 10⁻⁷—10⁻⁵% урана). В водах, омывающих урановые месторождения, концентрация радия и урана повышается на 2—3 порядка, резко увеличивается содержание радона. Речная вода ежегодно выносит в океан около 104 т урана, который оседает в донных отложениях, переходя из них в осадочные породы. В водах нефтяных месторождений по мере приближения к залежи содержание радия увеличивается до 10⁻⁸ г/л, а урана — уменьшается до 10⁻⁷ г/л.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

В период образования и последующего развития горные породы испытывают влияние различных факторов — температуры, давления и водных растворов солей. В результате происходит изменение строения и состава горных пород, меняются их физические свойства.

При большом давлении уменьшается пористость горной породы. Это ведет к уменьшению газовой и жидкой фаз в горной породе и, следовательно, к повышению плотности, скорости распространения волн, теплопроводности. С повышением температуры скорость распространения волн понижается.

Удельное сопротивление сухих горных пород с увеличением всестороннего давления уменьшается, что связано с закрытием пор и уменьшением непроводящей газообразной фазы. При действии давления на влажные горные породы удельное сопротивление увеличивается.

Наиболее существенное преобразование пород вызывает глубинный (региональный) метаморфизм, охватывающий большие толщи пород на значительных территориях. В результате воздействий высоких температур и давлений на глубине карбонатные породы превращаются в мраморы, осадочные терригенные породы — в кристаллические сланцы, а при еще более глубоких изменениях — в гранито-гнейсы. Зерна пород часто приобретают ориентированность, сами породы — тонкую слоистость, за счет которых появляется анизотропность. У метаморфизованных пород возрастают плотность, удельное сопротивление, магнитность, скорости свойства в тем большей степени, чем сильнее проявился региональный метаморфизм.

Метаморфизм умеренных глубин проявляется более локально и разнообразнее. За счет воздействия внедрившихся интрузий возникают контактные изменения пород в виде контактных роговиков, вторичных кварцитов. На контактах интрузивов и карбонатных пород образуются скарны, в состав которых часто входят магнетит и рудные минералы вольфрама, меди и других металлов. С удалением от интрузива интенсивность контактных изменений постепенно ослабевает. Это дает возможность по возрастанию сопротивления за счет ороговикования и окварцевания, по росту магнитности вследствие скарнообразования не только закартировать зону этих изменений, но и очертить интрузивный массив, даже если он является «слепым».

Плотность метаморфических горных пород определяется в основном их минеральным составом и пористостью. На величины σ , μ и J , в большой степени влияют состав первичных горных пород. Удельное сопротивление по мере увеличения степени метаморфизма растет от 10³—10⁵ до 10⁶—10⁸ Ом·м. С повышением степени метаморфизма наблюдается тенденция к увеличению скорости распро-

Таблица 9

Метаморфические горные породы	σ , г/см ³	$\kappa \cdot 10^4$, ед. СГС	$J_r \cdot 10^4$, ед. СГС	ρ , Ом·м	v , м/с
Микрокристаллические сланцы:					
кварцево-серицитовый, серицитовый, кремнистый	2,42—2,72	0—3	0—3	10^9 — 10^6	4900—5000
хлоритовый, кварцево-хлоритовый	2,61—2,69	0—3	0—3	10^9 — 10^5	2900—6300
Кристаллические сланцы:					
биотитовые	2,67—2,68	3—6	0—3	10^9 — 10^5	4500—5700
графитовые	2,44—2,60	0—3	—	—	—
амфиболовые	2,97—3,0	—	—	—	—
Гнейсы:					
биотит-плагиоклазовые	2,63—2,73	0—3	0—3	—	—
гранат-биотитовые, амфиболовые, пироксеновые	2,80—3,07	—	0—3	—	—
Амфиболит	2,90—3,06	15—30	0—3	10^6 — 10^7	3000—7200
Мрамор	2,68—2,70	—	—	10^6 — 10^7	—
Мигматит	2,61—2,70	0—30	0—3	—	1800—5800
Кварцит	2,57—2,68	0—3	0—3	10^6 — 10^8	—
Роговик	2,65—2,74	0—3	7—15	10^6 — 10^8	3900—6500
Скарн	2,90—3,47	120—400	20—120	10^6 — 10^8	—

странения волн. В табл. 9 приведены значения σ , κ , J_r , ρ и v для метаморфических пород.

Косвенными факторами, влияющими на изменение физических свойств горных пород, являются их глубина залегания, структурное положение, возраст. Горные породы, залегающие на больших глубинах или в антиклинальных структурах, длительное время подвергались воздействию высоких давлений и температуры. Поэтому они имеют низкую пористость, высокие значения плотности и скорости распространения упругих волн. По возрасту эти породы относятся к древним. Поскольку остаточное намагничение с течением времени уменьшается, то, изучая параметр Q в разных точках территории, можно разделять горные породы по их возрасту.

§ 5. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

Для геологического истолкования геофизических данных необходимо иметь сведения о петрофизических характеристиках пород в изучаемом районе. Эти характеристики могут быть полу-

чены путем измерений на образцах горных пород или из результатов полевых геофизических методов.

Образцы для измерения физических свойств отбирают из коренных обнажений горных пород, горных выработок и скважин. Чтобы оценить среднюю величину физического параметра одной разновидности горной породы, отбирают не менее 30—40 образцов. Для получения средних значений физических свойств пород результаты измерений образцов обрабатывают статистически. С этой целью данные измерений комплектуют в отдельные выборки по составу горных пород и другим особенностям. Сначала все

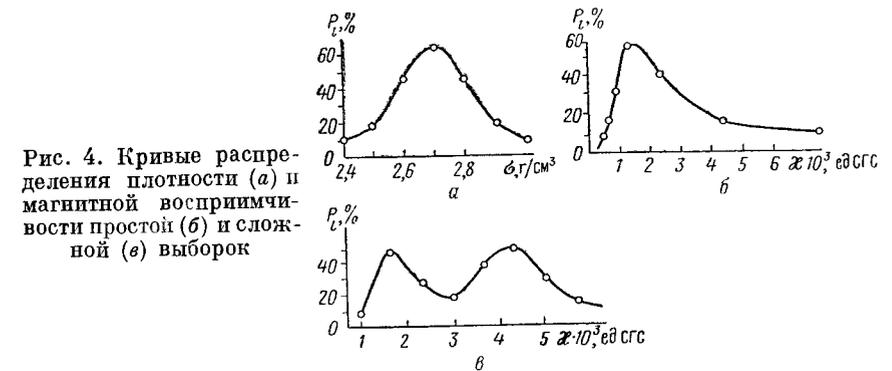


Рис. 4. Кривые распределения плотности (а) и магнитной восприимчивости простой (б) и сложной (в) выборок

измерения разбивают на равные интервалы таким образом, чтобы в выборке было 6—8 интервалов, а в каждом интервале не менее 3—5 измерений. Вычисляют среднее значение a_{cp} физического параметра в данном интервале. Находят отношение P_i образцов n_i интервалов к общему числу образцов N в данной выборке. Затем строят кривую распределения, где по оси абсцисс откладывают значения физических параметров, отвечающие серединам интервалов, а по оси ординат — значения P_i . Могут быть получены, по крайней мере, три типа кривых (рис. 4). Симметричная кривая, изображенная на рис. 4, а, отражает нормальный закон распределения физического параметра. При нормальном распределении вычисляют среднее значение \bar{a} физического параметра выборки по формуле

$$\bar{a} = \frac{\sum (n_i a_i)}{N} = \frac{n_1 a_1 + n_2 a_2 + \dots + n_k a_k}{N},$$

где n_i — количество образцов в интервале i ; a_i — середина интервала i .

Для оценки точности определения a вычисляют среднеквадратическую ошибку S его колебания, которую называют стандартным отклонением,

$$S = \sqrt{\frac{(a_1 - \bar{a})^2 n_1 + (a_2 - \bar{a})^2 n_2 + \dots + (a_k - \bar{a})^2 n_k}{N-1}} = \sqrt{\frac{\sum (a_i - \bar{a})^2 n_i}{N-1}},$$

где k — номер интервала ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Максимум кривой на рис. 4, а определяет наиболее вероятное значение a_i . В данном случае его величина совпадает со средним значением \bar{a} . Кривая на рис. 4, б, у которой максимум смещен в левую сторону, отражает логнормальный закон распределения. Если по оси x отложить логарифмы величин a_i , то будет получена симметричная кривая распределения. Ее среднее геометрическое \bar{a}_{lg} и стандарт S_{lg} вычисляют по аналогичным формулам, только в них вместо величин a_i необходимо поставить $\lg a_i$. Если получена кривая с двумя или более максимумами, значит, выборка имеет сложное строение (рис. 4, в) и должна быть разделена на несколько выборок, равных по числу наблюдаемых максимумов. Такое разделение выполняют на основе изучения состава пород.

Результаты статистической обработки представляют в виде сводной таблицы, в которой объединяют параметры, близкие по величине. Критерием такой схожести является положение, когда различие среднего значения параметра двух выборок находится в пределах среднеквадратической погрешности определения среднего. При изучении удельного сопротивления объединяют выборки, имеющие одинаковый порядок величины.

При наличии достаточного числа измерений физических параметров строят также петрофизические карты и разрезы, которые позволяют устанавливать связь этих параметров с особенностями геологического строения района.

§ 6. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАЗРЕЗЫ

Геофизический разрез — это изображение на вертикальной плоскости физических особенностей горных пород, обусловивших характер наблюдаемых геофизических полей. Различают плотностные, магнитные, электрические, сейсмические разрезы, отражающие те или иные особенности геологических разрезов.

Плотностной разрез характеризует состав и пористость горных пород, магнитный — распределение ферромагнитных или парамагнитных минералов, электрический — распределение электронно-проводящих минералов, зон трещиноватости и пористости, заполненных водой. Таким образом, геофизический разрез отражает такие особенности геологического разреза, которые оказывают заметное влияние на физические свойства горных пород. Геофизический разрез — это физическая модель геологического разреза (рис. 5).

Конкретному геологическому разрезу всегда отвечает один геофизический разрез, но геофизическому разрезу может соответствовать несколько вариантов геологического. В этом заключается неоднозначность геологического истолкования (интерпре-

тации) геофизического разреза. Используя комплекс физических параметров, данные бурения и результаты геофизических исследований, можно подобрать такой геологический разрез, который наиболее вероятен для данного геофизического разреза. Обычно геофизический и геологический разрезы совмещают, получая тем самым геолого-геофизический разрез (рис. 6).

Конкретному геолого-геофизическому разрезу отвечает единственное поле той или иной физической величины, которое можно рассчитать. Такой расчет называют решением прямой задачи, которое всегда однозначно. Конкретному полю может соответствовать несколько вариантов геолого-геофизических разрезов. Нахождение наиболее вероятного варианта называют решением обратной задачи разведочной геофизики.

В процессе геологического истолкования геофизических полей различают качественную и количественную интерпретации. Качественная интерпретация включает выделение геофизических аномалий или разнотипных по характеру поля участков, сопоставление их с геологическими данными по району и выводы о природе таких участков и аномалий. Количественная интерпретация заключается в определении количественных характеристик полученного геофизического разреза и установлении численных значений мощности, глубины залегания, размеров геологических объектов, создавших отдельные аномальные поля. На ее основе строят глубинные структурные карты и схемы.

На первом этапе количественной интерпретации применяют методы решения обратной задачи, предполагая, что аномалии обусловлены телами, которые можно уподобить сфере, круговому горизонтальному цилиндру, вертикальному брусу, горизонтально-слоистой среде и т. п. Для таких простых форм разработаны методы определения глубины залегания центра масс, верхней поверхности и мощности, углов наклона, некоторых физических параметров.

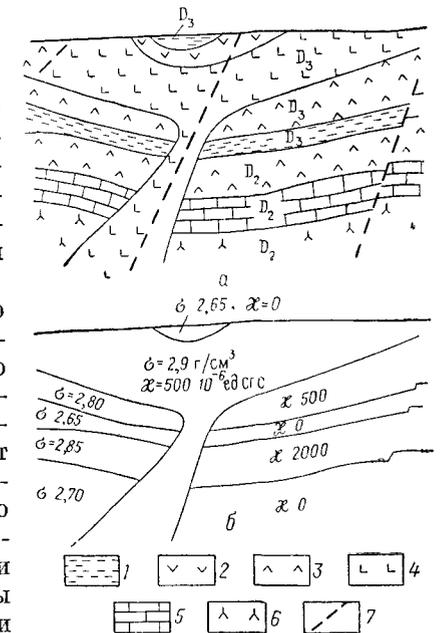


Рис. 5. Геологический разрез (а) и его физическая модель (б) пород среднего и верхнего девона.

1 — кремнистый сланец; 2 — базальт; 3 — андезит; 4 — диорит; 5 — известняк; 6 — диорит; 7 — разломы

На первом этапе количественной интерпретации строят физико-математическую модель геолого-геофизического разреза.

На втором этапе решают прямую задачу от полученной модели. Если рассчитанное поле совпадает с наблюдаемым, то можно говорить о том, что модель соответствует геофизическим данным. В случае несовпадения полей производят уточнение модели и вновь решают прямую задачу и т. д. Этот процесс, называемый п о д р о м, продолжается до тех пор, пока теоретическое поле не совпадет с наблюдаемым.

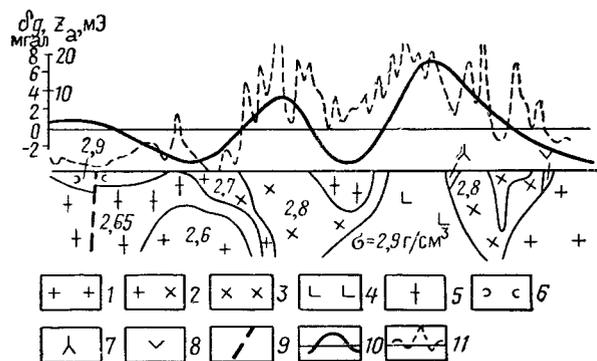


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез.
1 — гранит, 2 — гранодиорит, 3 — диорит, 4 — габбро, 5 — гранодиорит, 6 — туф, 7 — липарит, 8 — базальт, 9 — разлом, 10 — график локальной аномалии силы тяжести, 11 — график магнитного поля

§ 7. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Конечной целью геологоразведочных работ является выявление и детальное изучение месторождений полезных ископаемых. Все исследования проводят в три последовательных этапа: геологическое картирование, поиски и разведка. Геологическое картирование позволяет выделить перспективные комплексы пород и структуры, в пределах которых проводятся поисковые работы. Обнаруженные месторождения полезных ископаемых передают для разведки, целью которой является определение строения, формы и размеров залежей и запасов месторождения. На всех этапах применяют геофизические методы, которые являются методами геологического картирования, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

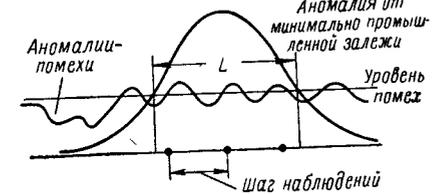
В отдаленных и мало изученных районах выполняют в первую очередь мелкомасштабные (1 : 200 000—1 : 1 000 000) геофизические исследования с целью выявления металлогенических зон, перспективных нефтегазоносных структур и комплексов пород, в пределах которых затем проводят поисковые геофизические работы в масштабе 1 : 100 000—1 : 25 000. Результатом этих работ может быть открытие рудных районов или крупных нефтегазоносных структур, в пределах которых выполняют детальные работы масштабом 1 : 10 000, 1 : 2000.

Геофизические работы выполняют специализированные партии и отряды в составе геофизических экспедиций, имеющих аппара-

турную мастерскую и транспортные средства. Мелкие геофизические работы, сопровождающие геологическое картирование, выполняют геофизические службы геологических организаций.

Геофизические партии комплектуются по методу выполняемых работ (сейсмическая, гравиметрическая, каротажная и т. д.) или по виду главной решаемой задачи (железорудная, гидрогеологическая и т. д.). Работники партии получают от экспедиции геологическое задание и составляют проект. Он состоит из геологической и технико-экономической частей и сметы. В геологической части описывают географо-экономические условия проведения работ, геологический очерк, обоснование рационального комплекса методов, методику, технику и объемы геофизических

Рис. 7. Выбор шага геофизических наблюдений



работ. При описании географо-экономических условий указывают климат, рельеф местности, условия передвижения (залесенность, наличие пахотных земель), наличие промышленных предприятий, производят оценку возможных промышленных помех. В геологическом очерке дают характеристику физических параметров горных пород и их влияние на физические поля.

Далее обосновывают рациональный комплекс геофизических исследований, т. е. такой набор методов, который позволяет с наибольшей геологической эффективностью и наименьшими затратами времени и средств выполнить геологическое задание.

Рациональный комплекс включает один или несколько основных и вспомогательных методов. Метод, позволяющий наиболее эффективно решить главную задачу, называют о с н о в н ы м или в е д у щ и м (магниторазведка при поисках магнетита, сейсморазведка при поисках нефтегазоносных структур, радиометрия при поисках урана, плотностной каротаж при выделении пластов угля и т. д.).

В главе, посвященной методике и технике работ, обосновывают сеть наблюдений (расстояние между точками наблюдений по профилю и между профилями), систему и приемы наблюдений, объем работ и аппаратуру. Расстояние между соседними точками профиля называют ш а г о м н а б л ю д е н и й. На поисковом этапе его принимают в 2—3 раза меньшим ширины L уверенно выделяемой части аномалии на среднем уровне полей помех (рис. 7).

Полученный по расчету шаг наблюдений округляют до ближайшей цифры, кратной 5; 10; 20; 25; 50; 100; 200 м. Принятый шаг позволяет зафиксировать аномалию шириною L двумя-тремя

точками. Расстояние между соседними профилями принимают равным $1/2—1/3$ длины, уверенно выделяемой на уровне помех части аномалии. В сейсморазведке учитывают размеры искоемых структур, и сеть наблюдений должна обеспечить уверенное их обнаружение хотя бы одним профилем.

На стадии детальных исследований сеть наблюдений принимается такой, чтобы измеряемая величина между соседними точками наблюдений и профилями изменялась по прямолинейному закону. Это дает возможность установить точную конфигурацию аномалии, определить ее эпицентр, выполнить количественную интерпретацию. Системы и приемы наблюдений в каждом методе имеют свои особенности, которые описаны ниже.

В технико-экономической части проекта определяют объемы геофизических работ в километрах (метрах), точках наблюдений или в квадратных километрах. Рассчитывают необходимые затраты труда (в человеко-днях, отрядо-днях, бригадо-сменах) и транспорта (в машино-сменах, коне-днях, часах самолетного или вертолетного времени). В зависимости от продолжительности полевого периода рассчитывают численность инженерно-технического персонала, рабочих, количество транспортных единиц, аппаратуры и оборудования. Описывают организацию работ (база партии, отрядов, начало и завершение работ, порядок отработки участков, основные этапы работ) и определяют сметную стоимость.

Точки сети наблюдений выносит на местность специальная топографическая бригада.

Аппаратуру для геофизических наблюдений выбирают такую, которая позволяет выполнить работу с заданной в проекте точностью с минимальными затратами времени и средств.

В полевых наземных методах магниторазведки, гравиразведки и радиометрии применяются легкие (3—5 кг) переносные приборы: гравиметры, магнитометры, радиометры. Для исследования небольших глубин (100 м) электроразведкой используют переносные приборы массой 7—8 кг. В сейсморазведке для изучения малых глубин применяют переносные установки, состоящие из нескольких блоков небольшой массы.

Питание электронных или полупроводниковых схем переносной аппаратуры осуществляется от специальных галетных или сухих батарей и накальных элементов. Измеряемые величины в переносных приборах и установках отсчитывают визуально по отклонению стрелки или светового блика на шкале прибора.

Для исследования больших глубин методами сейсморазведки и электроразведки применяют соответственно сейсмические и электроразведочные станции, устанавливаемые на автомашинах. Электроразведочная станция содержит мощный генератор, с помощью которого в землю подаются токи большой величины (десятки ампер). Изучение скважин ведут с помощью автоматических каротажных станций. В отдаленных и малопроезжих райо-

нах электроразведочные, радиометрические и магниторазведочные работы ведут с помощью станций, установленных на самолетах или вертолетах.

В процессе полевых работ инженерно-технический персонал геофизической партии контролирует качество измерений, ведет полевую обработку материалов.

Предварительная (текущая) оценка качества работ дается на основе повторных наблюдений на некоторых точках или интервалах (при непрерывной автоматической записи) измерений. Если расхождение между основным и повторным замерами не превышает величины, установленной инструкцией, то аппарат работает нормально. Такой контроль можно назвать внутренним.

Вместе с тем показания геофизических приборов зависят от изменения атмосферных условий (температуры, влажности), индивидуальных особенностей наблюдателя, наличия и уровня помех и других факторов. Поэтому окончательная оценка качества геофизической съемки на участке дается в результате независимого (внешнего) контроля. Он выполняется в количестве от 3 до 10% объема основных рядовых наблюдений, руководящим персоналом партии или по его распоряжению другими наблюдателями в другое время и обычно с другими экземплярами аппаратуры. Оценку качества ведут путем визуального сопоставления графиков основного и контрольного наблюдений или путем расчета среднеквадратичной или средней относительной погрешности.

Визуальное сопоставление графиков выполняют в том случае, если измеряемая величина может измениться со временем (эманационная съемка) или при незначительном несовпадении местоположения датчиков основного и контрольного приборов (радиометрия). В большинстве геофизических методов, где погрешность измерения не зависит от амплитуды измеряемого сигнала (гравиразведка, магниторазведка), для оценки точности применяют среднеквадратическую погрешность m , полученную по результатам двойных (основного и повторного) измерений. Ее вычисляют по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \dots + \Delta_n^2}{2n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{2n}},$$

где n — число точек, в которых выполнены двойные измерения; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ — разности между результатами основного и повторного наблюдений в точках 1, 2, 3, ..., n ; $\sum \Delta^2$ — сумма квадратов этих разностей.

При использовании методов электроразведки в каротажных и радиоактивных исследованиях, где точность измерений зависит от амплитуды измеряемого сигнала, для оценки погрешности применяется средняя относительная погрешность, вычисляемая по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \left\{ \left| \frac{a_1^k - a_1^0}{\frac{a_1^k + a_1^0}{2}} \right| + \left| \frac{a_2^k - a_2^0}{\frac{a_2^k + a_2^0}{2}} \right| + \dots + \left| \frac{a_n^k - a_n^0}{\frac{a_n^k + a_n^0}{2}} \right| \right\} =$$

$$= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots + \varepsilon_n}{n} = \frac{\sum_1^n \varepsilon_i}{n},$$

где a_i^0 и a_i^k ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) — результаты соответственно основного и контрольного замеров в точках 1, 2, 3, ..., n ; ε_i — относительная ошибка измерения в точке i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); $\sum \varepsilon_i$ — сумма относительных ошибок в точках от 1 до n .

Качество работы считается удовлетворительным, если не имеется принципиальных расхождений в поведении сравниваемых графиков или если ошибки m или ε не превышают допустимых величин. Допустимые величины ошибок определяются технической инструкцией по каждому методу и уточняются в процессе проектирования. Во многих электроразведочных методах величина допустимой средней относительной ошибки составляет 5—10%. Если на каком-либо участке полученная погрешность превысит допустимую, значит качество работ плохое, и съемку на нем повторяют вновь.

§ 8. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Данные полевых наблюдений с переносными приборами обычно заносят в специальные полевые журналы. Форма их зависит от метода и способов измерения физических величин. На титульном листе полевого журнала записывают адрес партии (экспедиции), название участка, фамилии начальника партии, наблюдателя, помощника. Перед началом и в конце рабочего дня отмечают дату наблюдений, а в течение дня — привязку точек наблюдений (номер профиля, пикет), измеряемые величины и другие данные. В методах электроразведки в процессе наблюдений строят полевой график измеряемой величины. Полевой журнал сдают в камеральную группу партии для окончательной обработки.

Данные наблюдений с автоматическими станциями получают в виде диаграммных лент. На ленту наносят штамп организации, выполняющей работы. В нем указывают наименование аппаратуры, название участка или скважины, особенности применяемой методики, данные проверки и градуировки аппаратуры и другие сведения. Диаграммы поступают в камеральную группу для окончательной обработки, где в специальном журнале ведется их учет.

Результаты маршрутных исследований изображают в виде графиков, а площадных съемок — в виде планов графиков и изолиний геофизических полей. Масштаб графиков и сечение изолиний выбирают таким образом, чтобы выделить заслуживающие интереса аномалии минимальной амплитуды, но в то же время ослабить влияние аномалий-помех. С этой целью сечение изоли-

ний принимают близким к удвоенной—утроенной величине погрешности полевых наблюдений, а масштаб графика таким, чтобы величина утроенной погрешности укладывалась в интервале 5—10 мм.

При аэрогеофизических, сейсмических и ряде электроразведочных и каротажных методах результаты полевых наблюдений, записанные на магнитной ленте в двоично-цифровом коде, через устройство ввода информации (УВИ) вводят в память ЭВМ. Вычислительная машина по заданной программе выполняет все необходимые операции по обработке и интерпретации информации. С выхода ЭВМ информация передается на графопостроитель. Он вычерчивает в необходимом масштабе графики или изолинии, печатает результаты количественной информации.

В результате применения ЭВМ ускоряется процесс обработки, высвобождается технический персонал и большее внимание уделяется геологическому истолкованию полученных материалов. Интерпретация ведется на имеющейся геологической основе с учетом измерения физических свойств горных пород. Кроме того учитываются материалы геофизических и геологических съемок прошлых лет.

По результатам интерпретации строят геолого-геофизические разрезы, структурно-геологические схемы, выделяют аномалии, перспективные на поиски месторождений полезных ископаемых.

Окончательная камеральная обработка завершается составлением отчета. Он состоит из текста, графических и текстовых приложений. Текст отчета состоит из введения, краткой геолого-геофизической характеристики района, описания методики и техники полевых работ, интерпретации результатов работ и заключения. Структура отчета по методике интерпретации напоминает по форме соответствующие главы проекта, однако изложение ведется на основе тех данных, которые получены в результате работ. В остальных главах описывают, каким образом выполнена интерпретация, степень решения главной и дополнительных задач, выводы по уточнению геологического строения, рекомендации по дальнейшим поисковым геологическим и геофизическим работам.

Г Л А В А II

МАГНИТОРАЗВЕДКА

Магнитный метод разведочной геофизики основан на изучении особенностей распределения геомагнитного поля в пространстве. Породы, слагающие верхнюю часть земной коры и имеющие различные магнитные свойства, являются источниками магнитных аномалий. Изучая аномалии, можно судить о местоположении, глубине залегания и размерах геологических объектов, вызывающих эти аномалии. Магниторазведка находит широкое применение на всех этапах геологических исследований.

При составлении геологических карт постановка магнитной съемки является обязательной, причем при мелко- и среднемасштабном геологическом картировании используются главным образом материалы аэромагнитных съемок, при крупномасштабном картировании (в масштабах 1 : 10 000 и крупнее) — наземные магнитные съемки.

Велика роль магниторазведки при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, особенно железорудных. С помощью магниторазведки в нашей стране обнаружен ряд месторождений железа (КМА, Соколовско-Сарбайское, Качарское и др.). Результаты магниторазведки используются при поисках месторождений нефти и газа, цветных и редких металлов, бокситов, алмазов.

§ 9. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО ЭЛЕМЕНТЫ

Земля представляет собой гигантский магнит, поле которого в первом приближении можно уподобить полю однородно намагниченного шара. Силовые магнитные линии выходят из северного магнитного полюса, расположенного в южном полушарии, и, распространяясь на десятки тысяч километров в околоземном пространстве, входят в южный магнитный полюс, расположенный в северном полушарии. Местоположения географических и магнитных полюсов не совпадают, так как магнитная ось земного шара отклонена от оси вращения Земли примерно на 12° .

Проявления магнитного поля Земли весьма разнообразны и знание их необходимо. С древнейших времен люди пользуются магнитными компасами, без которых были бы невозможны мореплавание и путешествия. Создание компаса было необходимым шагом к величайшим географическим открытиям.

Магнитное поле Земли намагничивает горные породы, слагающие верхние части земной коры, открывая путь к поискам

месторождений полезных ископаемых. Оно используется при составлении топографических планов и карт, оказывает влияние на состояние ионосферы, через которую осуществляется радиосвязь, вместе с атмосферой предохраняет все живое на Земле от губительного космического и солнечного излучения.

В каждой точке земной поверхности магнитное поле характеризуется напряженностью, абсолютная величина которой обозначается \vec{T} . Положение вектора \vec{T} в пространстве определяется двумя углами — наклоном J и склонением D (рис. 8). Вектор \vec{T} может быть разложен на вертикальную \vec{Z} и горизонтальную \vec{H} составляющие напряженности. Величины \vec{T} , \vec{H} , \vec{Z} , J и D называются элементами геомагнитного поля.

Магнитное склонение — это угол между астрономическим и магнитным меридианами (рис. 8). Астрономический меридиан определяет истинное положение линии север — юг в данной точке.

Плоскостью магнитного меридиана называется вертикальная плоскость, в которой лежит вектор \vec{T} . Воображаемая линия пересечения плоскости магнитного меридиана с земной поверхностью называется магнитным меридианом. Направление горизонтально расположенной магнитной стрелки компаса в каждой точке Земли совпадает с магнитным меридианом, а свободно подвешенная стрелка устанавливается вдоль вектора \vec{T} . Принято восточное склонение считать положительным, западное — отрицательным.

Наклоном называется угол между горизонтальной плоскостью и вектором \vec{T} . При наклоне вниз северного конца стрелки наклонение называют северным (или положительным), южного — южным (или отрицательным).

Вертикальной составляющей \vec{Z} геомагнитного поля называется проекция вектора \vec{T} на вертикальную ось z , горизонтальной составляющей \vec{H} магнитного поля называется проекция вектора \vec{T} на горизонтальную плоскость. Легко видеть, что направление \vec{H} совпадает с направлением магнитного меридиана. Иногда горизонтальную составляющую разлагают на восточную \vec{Y} и северную \vec{X} составляющие.

Между элементами геомагнитного поля существуют следующие связи:

$$\vec{T} = \sqrt{\vec{Z}^2 + \vec{H}^2}, \quad \text{tg } J = \frac{\vec{Z}}{\vec{H}}.$$

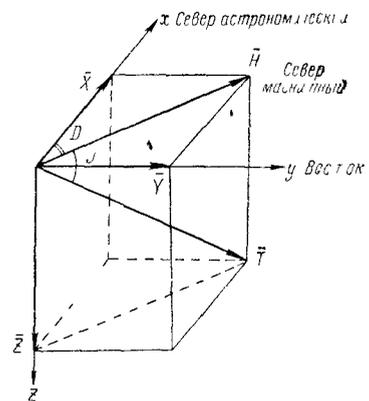


Рис. 8. Элементы геомагнитного поля

В магнитной разведке измеряют обычно одну—две составляющие поля (\bar{Z} , \bar{H} и D), так как остальные могут быть найдены по уравнениям связи.

За единицу напряженности магнитного поля принимают напряженность такого поля, которое на единичную магнитную массу действует с силой в 1 дину. В системе СГС напряженность измеряется в эрстедах (\mathcal{E}) в честь датского физика Эрстеда, открывшего в 1820 г. существование магнитного поля вокруг проводника с электрическим током. Для измерения магнитного поля Земли единица \mathcal{E} является довольно крупной, поэтому в практике применяются более мелкие единицы: миллиэрстед ($1 \text{ мЭ} = 1/1000 \mathcal{E}$) и гамма ($1 \text{ гамма} = 1/100\,000 \mathcal{E}$).

В системе СИ вместо эрстеда дается новая единица напряженности магнитного поля, выражаемая в амперах на метр (А/м): $1 \mathcal{E} = 10^3/4\pi \text{ А/м} = 79,5775 \text{ А/м}$.

Магнитное поле Земли как поле намагниченного шара имеет простое математическое выражение:

$$\bar{T} = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi}, \quad \bar{Z} = \frac{2M}{r^3} \sin \varphi,$$

$$\bar{H} = \frac{M}{r^3} \cos \varphi,$$

где M — магнитный момент шара; r — расстояние от центра шара до точки наблюдения; φ — магнитная широта.

Из приведенных формул следует, что на магнитных полюсах, где $\varphi = 90^\circ$, составляющая $Z = T = 2M/r^3$, $H = 0$, а магнитная стрелка занимает вертикальное положение, так как наклонение $J = 90^\circ$. На магнитном экваторе составляющая $\bar{H} = \bar{T} = M/r^3$, $Z = 0$, а магнитная стрелка располагается горизонтально. Величина напряженности геомагнитного поля сравнительно невелика: значение T увеличивается от 0,3—0,4 \mathcal{E} на экваторе до 0,6 \mathcal{E} на полюсах; составляющая Z изменяется от нуля на экваторе до 0,6 \mathcal{E} на полюсах; составляющая H изменяется от 0,3—0,4 \mathcal{E} на экваторе до нуля на полюсах. Для сравнения можно отметить, что в лабораториях без труда могут быть созданы искусственные поля в тысячи и более эрстед. Но хотя напряженность магнитного поля Земли мала, вследствие огромного объема планеты она обладает колоссальным магнитным моментом $8,9 \times 10^{25}$ ед. СГС.

Вопрос о происхождении магнитного поля Земли в настоящее время является нерешенным. Из существующих гипотез о возникновении магнитного поля Земли рассмотрим две.

В основе первой гипотезы лежит попытка объяснить наблюдаемое поле повышенной намагниченностью вещества земного шара. Однако эта гипотеза испытывает серьезные затруднения, заключающиеся в следующем.

Так как, по данным геотермических исследований, температура Земли на глубине 30 км достигает величины 900—1000° С, при которой ферромагнетизм любого намагниченного вещества исчезает, то для объяснения магнитного поля Земли следует предположить, что магнитные массы сосредоточены в слое толщиной 30 км. Но в этом случае для объяснения величины наблюдаемого магнитного поля Земли следует допустить, что породы этого слоя обладают намагниченностью, в несколько раз превышающей намагниченность чистого магнетита, что является неправдоподобным.

Однако то, что горные породы земной коры участвуют в формировании магнитного поля Земли, является несомненным. Горные породы, температура которых ниже точки Кюри, намагничиваясь полем Земли, создают свои магнитные поля, которые дают важную информацию о строении земной коры.

Вторая гипотеза предполагает связь магнитного поля Земли с наличием электрических токов в ее ядре. На основании новейших сейсмических данных, радиус ядра Земли составляет примерно 3500 км, причем предполагается, что ядро состоит из расплавленного металла железоникелевого состава. Температура в ядре 4000—5000° С, давление достигает $1 \cdot 10^5$ кгс/см². В этих условиях образуется большое количество свободных электронов, среда приобретает высокую электрическую проводимость. Если допустить наличие некоторого первичного магнитного поля, в котором вращается Земля, то при движении электропроводящего вещества в этом поле в нем возникают электрические токи. Эти токи в свою очередь, порождают свое вторичное магнитное поле, которое, как считают исследователи, является причиной современного магнитного поля Земли. Считают, что в ядре существуют не только круговые электрические токи, возникающие при вращении Земли, но и электрические токи, связанные с перемещением масс под действием энергии радиоактивного распада. В качестве первичного магнитного поля можно принять небольшое межпланетное поле.

§ 10. ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ И РАКЕТ

За короткий промежуток времени, прошедший со дня запуска первого искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.), в космосе проведено много фундаментальных исследований, среди которых значительное место занимают измерения магнитного поля Земли и космического пространства.

С помощью измерений составляющих магнитного поля в околоземном пространстве и в космосе установлены границы проявления магнитного поля Земли — магнитосферы, выявлен характер этого поля, подтверждена «земная» его природа. Оказалось, что магнитное поле Земли с высотой убывает обратно пропорционально

кубу расстояния, т. е. оно подобно полю шара, но изолинии земного магнитного поля имеют сложный характер. Последнее объясняется взаимодействием магнитного поля Земли с так называемым солнечным ветром, представляющим поток заряженных частиц, постоянно выбрасываемых Солнцем. Граница магнитосферы со стороны, обращенной к Солнцу, имеет форму полусферы, силовые линии внутри этой полусферы близки по форме к силовым линиям шара (рис. 9). С противоположной стороны область магнитосферы

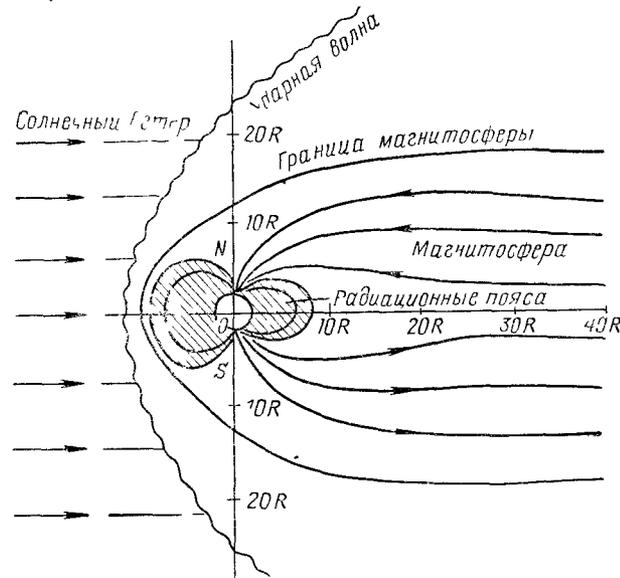


Рис. 9. Магнитосфера Земли (R — радиус Земли)

имеет резко отличный характер, изолинии поля вытянуты, причем в пределах исследований части космического пространства (на расстояниях до 200 тыс. км) изолинии не замыкаются. Эта часть магнитного поля Земли называется хвостом магнитосферы или геомагнитным шлейфом.

Магнитное поле Земли существенным образом влияет на электрически заряженные частицы, непрерывным потоком поступающие от Солнца и из космического пространства. С помощью искусственных спутников и ракет выявлены зоны повышенной космической радиации, представляющие собой своеобразные магнитные ловушки, попадая в которые, протоны и электроны совершают сложные спиралеобразные движения вдоль силовых линий земного магнитного поля. Зоны повышенной космической радиации служат своеобразным мостом между полюсами Земли, по которому мгновенно распространяются любые электромагнитные возмущения. Существованием этих зон объясняется наличие полярных сияний только в высоких широтах и синхронность вспышек сияний.

Аналитические выражения составляющих поля Земли как поля однородно намагниченного шара справедливы лишь с точностью примерно до 25%. Как показали исследования ученых, магнитное поле Земли имеет более сложный характер вследствие непостоянства магнитного поля во времени и существования на земной поверхности участков, в пределах которых магнитное поле претерпевает резкие изменения.

Учитывая сложность аналитического представления магнитного поля Земли, пользуются не теоретическими, а практическими данными, основывающимися на измерениях элементов земного магнетизма. С этой целью проводятся планомерные магнитные съемки.

В СССР такая съемка, носящая название генеральной магнитной съемки, начата в 1931 г. Она охватила всю территорию Советского Союза, причем на европейской ее части съемка была площадной, по сети 20×20 или 20×30 км, а на азиатской — маршрутной, с расстояниями между точками 20—30 км. На каждой точке измерялись величины D , J и H . Первые магнитные карты территории СССР были построены в 1936 г. С 1937 г. систематические магнитные съемки выполняются Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук СССР (ИЗМИРАН).

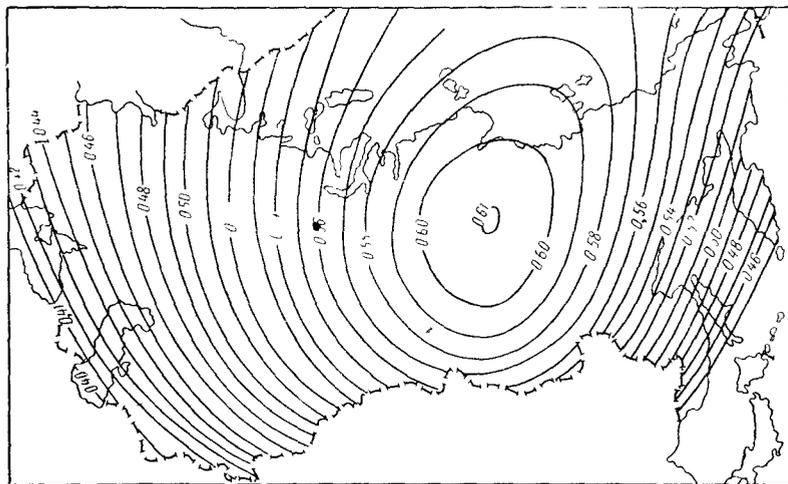
На основании измерений путем сглаживания изолиний или осреднения значений поля по определенным площадям строят карты элементов геомагнитного поля. Анализ этих карт показывает, что на общем фоне плановых изолиний, характеризующих поле Земли как поле однородно намагниченного шара, выделяется ряд крупных по размерам аномалий, соизмеримых с площадями материков, вследствие чего их называют материковыми. На поверхности Земли отмечается несколько материковых аномалий, одна из которых, Восточно-Азиатская, располагается на территории СССР, охватывая область Сибирской платформы (рис. 10). Это одна из крупнейших материковых аномалий планеты, четко выделяющаяся на картах всех элементов геомагнитного поля.

Так как определяемая глубина источника материковых аномалий составляет доли земного радиуса, считают, что источник материковых аномалий находится внутри Земли. Это дает основание предполагать, что природа однородной намагниченности Земли и материковых аномалий одна и та же.

Вследствие такой связи полей нормальным геомагнитным полем T_0 (или главным магнитным полем Земли) называют поле однородно намагниченного шара T_1 плюс материковая аномалия T_2 , т. е. $T_0 = T_1 + T_2$. Карты элементов геомагнитного поля, полученные на основании генеральной магнитной съемки, называются картами нормального поля,

причем карты изолиний \bar{T} , \bar{Z} и \bar{H} называются к а р т а м и и з о - д и н а м \bar{T} , \bar{Z} и \bar{H} , карты изолиний склонения — к а р т а м и и з о г о н, изолиний наклонения — к а р т а м и и з о к л и н.

Карты нормального поля по всем элементам геомагнитного поля составляют на середину определенного года, относят к определенной эпохе. Это объясняется тем, что магнитное поле Земли изменяется во времени. Как показывает анализ карт нормального поля, значения поля и скорость его изменения в различных точках земной поверхности неодинаковы. Скорость изменения



перемещаются по земной поверхности. Для вертикальной составляющей насчитывают пять главных фокусов, где изменение поля достигает 100—160 гамм в год: индонезийский (—130 гамм), иранский (+110 гамм), южноафриканский (+130 гамм), атлантический (—110 гамм) и южноамериканский (+160 гамм).

Территория СССР находится в зоне возрастания Z , обусловленной близостью иранского фокуса (рис. 11). Вековые изменения поля, по-видимому, имеют тенденцию к периодичности, но поскольку наблюдения за изменениями поля стали производиться

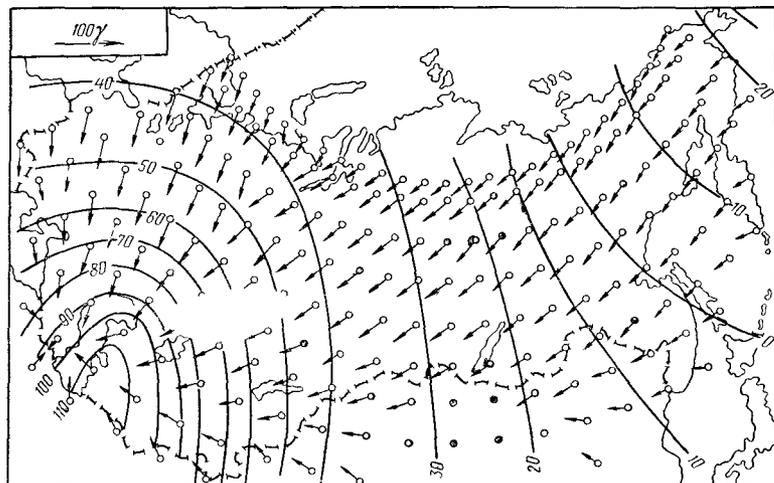


Рис. 11. Карта изопор Z (в гаммах) для эпохи 1942 г.

сравнительно недавно (с XVI в.), то выявить полный период векового хода пока не удалось.

Возникновение вековых изменений поля, по всей вероятности, связано с процессами, протекающими внутри Земли. Замечено, что многие фокусы векового хода приурочены к геосинклинальным областям. Исследования В. П. Орлова в 1947 г. в одном из районов Средней Азии показали, что на общем плавном поведении векового хода наблюдаются резкие изменения, приуроченные к зонам глубинных разломов. Аналогичные явления отмечались в Карпатах.

Магнитное поле Земли претерпевает не только вековые изменения, связанные с протекающими в ее недрах процессами, но и изменения, связанные с внешними источниками, — главным образом с солнечной активностью. Ультрафиолетовые солнечные лучи, попадая в верхние слои атмосферы, ионизируют ее, т. е. создают электрически заряженные частицы — ионы и электроны. В результате этого вокруг Земли на высоте 80 км и более образуется электропроводящий слой — ионосфера, которая находится

в непрерывном движении в магнитном поле Земли, и поэтому вокруг ее слоев, как вокруг проводника с током, возникает свое магнитное поле, оказывающее влияние на магнитное поле Земли.

Изменения геомагнитного поля проявляются в виде вариаций периодических (суточных и годовых), непериодических (магнитных бурь) и короткопериодных.

Суточные вариации имеют период, равный суткам. Их интенсивность зависит от широты и времени года, так как они определяются интенсивностью ультрафиолетового излучения Солнца. Замечено, что суточные вариации имеют одинаковые амплитуды в точках, лежащих на одной широте, более интенсивны днем, чем ночью, их амплитуда больше летом, чем зимой. Эти закономерности говорят о том, что характер суточных вариаций находится в прямой зависимости от длительности солнечного освещения. Суточные вариации вертикальной составляющей геомагнитного поля в средних широтах составляет 15—20 гамм, горизонтальной составляющей — 20—30 гамм.

Годовые вариации — это изменения среднемесячных значений напряженности магнитного поля. Их интенсивность невелика (1—5 гамм).

Магнитные бури — непериодические вариации — характеризуются продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток и интенсивностью от нескольких гамм до тысяч гамм. Магнитные бури могут охватить весь земной шар, но чаще они отмечаются в северных и южных широтах. Происхождение магнитных бурь ученые объясняют следующим образом. В периоды, когда на Солнце возникают пятна, происходят сильные взрывы, вследствие чего выбрасывается огромное количество заряженных частиц. Частицы, приближаясь к Земле, захватываются ее магнитным полем, образуя гигантский круговой электрический контур радиусом 20—25 тыс. км. Магнитное поле этого тока и создает магнитную бурю, охватывающую одновременно огромные территории. Магнитные бури повторяются редко, в среднем 2—3 раза в год. Они наблюдаются чаще в дни весеннего и осеннего равноденствия (март — апрель, август — сентябрь), а также в годы интенсивной солнечной активности, повторяющейся с периодом в 11 лет.

Магнитные измерения, выполненные во время магнитных бурь, как правило повторяют, так как учесть их с нужной точностью не удается.

Короткопериодные вариации магнитного поля Земли наблюдаются в виде кратковременных изменений поля в течение времени от тысячных долей секунды до нескольких минут. Интенсивность изменения составляющих напряженности поля достигает нескольких гамм. Возникновение короткопериодных вариаций связывают с изменением интенсивности ультрафиолетового излучения.

§ 14. ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Современная наука объясняет природу магнитных полей движением электрических зарядов. Однако долгое время магнитные явления связывали с понятиями о магнитных массах, плотности магнетизма и др. Эти понятия упрощают понимание теоретических основ магниторазведки и используются до сих пор.

С давних пор человек знаком с постоянными магнитами. По форме наиболее простым является стержневой магнит. Способность к притяжению железных предметов у такого магнита наиболее ярко выражена у концов стержня, которые называются *полюсами*. Действие магнита на любой магнитный предмет зависит от величины магнитных масс полюсов и от расстояния между ними, поэтому основной характеристикой постоянного магнита считают его магнитный момент M , равный произведению массы одного из полюсов магнита m на расстояние между полюсами $2l$, т. е. $M = 2ml$.

Постоянный магнит на рисунках схематически изображают стрелкой, при этом центр стрелки совпадает с центром магнита, длина стрелки определяет величину магнитного момента в определенном масштабе, а ее направление соответствует направлению вдоль оси магнита от южного его полюса к северному.

Из курса физики известно, что полюсы двух магнитов, удаленных друг от друга на некоторое расстояние, взаимодействуют. Сила взаимодействия полюсов двух различных магнитов с массами m_1 и m_2 , находящихся на расстоянии r , подчиняется закону Кулона, согласно которому $F = m_1 m_2 / \mu r^2$, где μ — коэффициент, характеризующий магнитные свойства среды, называемый *магнитной проницаемостью*. С магнитной восприимчивостью он связан соотношением $\mu = 1 + 4\chi$.

Для вакуума значения $\mu = 1$, для воздуха $\mu = 1,0000001$, т. е. коэффициент μ для воздуха практически равен единице, и в этом случае

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

При измерениях напряженности магнитного поля довольно часто используется способ, основанный на сравнении измеряемого поля с полем постоянного магнита, величина которого известна.

В качестве измерительного элемента используется подвижная магнитная стрелка nS , а в качестве компенсирующего (отклоняющего) — стержневой магнит NS . Стрелка и отклоняющий магнит располагаются в горизонтальной плоскости. Причем стрелка может вращаться в этой плоскости вокруг вертикальной оси, а отклоняющийся магнит устанавливается в одном из следующих строго фиксированных положений (рис. 12).

1. Отклоняющий магнит располагается перпендикулярно к магнитному меридиану, при этом центр стрелки лежит на продолже-

и оси магнита. Это положение называется первым положением Гаусса (рис. 12, а).

2. Отклоняющий магнит располагается перпендикулярно к магнитному меридиану так, что центры магнита и стрелки лежат на одном меридиане. Это положение называется вторым положением Гаусса (рис. 12, б).

3. Отклоняющий магнит располагается перпендикулярно к стрелке так, что центр стрелки лежит на продолжении оси отклоняющего магнита. Это положение называется *первым положением Ламона* (рис. 12, в).

4. Отклоняющий магнит располагается перпендикулярно к стрелке, при этом центр магнита лежит на продолжении оси стрелки. Это положение носит название *второго положения Ламона* (рис. 12, г).

Магнитная стрелка, помещенная в однородное магнитное поле, займет некоторое положение равновесия под действием двух сил: горизонтальной составляющей земного поля \bar{H} и силы, с которой отклоняющий магнит действует на стрелку. Уравнения равновесия стрелки, куда входят величины моментов действующих сил и линейные размеры взаимодействующих магнитов, довольно сложны. Если допустить, что размеры магнитов малы по сравнению с расстоянием между их центрами, то уравнения равновесия стрелки будут иметь следующий вид:

$$\bar{H} \operatorname{tg} \alpha = \frac{2M}{r^3} \text{ первое положение Гаусса,} \quad (1)$$

$$\bar{H} \operatorname{tg} \alpha = \frac{M}{r^3} \text{ второе положение Гаусса,} \quad (2)$$

$$\bar{H} \sin \alpha = \frac{2M}{r^3} \text{ первое положение Ламона,} \quad (3)$$

$$\bar{H} \sin \alpha = \frac{M}{r^3} \text{ второе положение Ламона,} \quad (4)$$

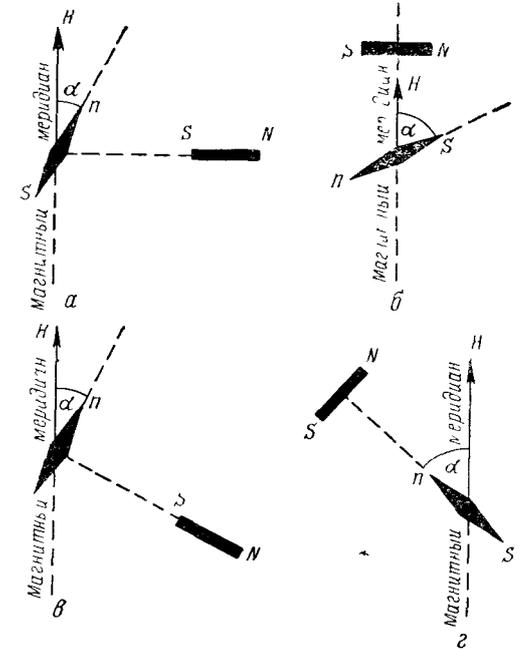


Рис. 12. Схема взаимного положения магнитов

где M — магнитный момент отклоняющего магнита; r — расстояние между центрами магнита и стрелки; α — угол отклонения стрелки от линии магнитного меридиана.

§ 15. ПОНЯТИЕ ОБ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

При абсолютных измерениях определяют следующие элементы поля: склонение D , наклонение J , горизонтальную составляющую \bar{H} и модуль полного вектора \bar{T} .

Практически при измерении склонения D достаточно определить магнитный и географический азимуты какого-либо направления на удаленный предмет, при этом географический азимут направления должен быть известен из астрономических наблюдений, а магнитный азимут его определяют с помощью деклинаторов или бусселей.

Наклонение J измеряют с помощью стрелочных инклинометров. В качестве чувствительного элемента инклинометра используется магнитная стрелка, вращающаяся в плоскости вертикального круга с делениями. Ось вращения стрелки горизонтальна и проходит через центр круга. Если круг расположить в плоскости магнитного меридиана, тогда положение стрелки определит угол J .

Абсолютные измерения горизонтальной составляющей \bar{H} могут быть произведены несколькими способами. Рассмотрим наиболее распространенный способ Гаусса — Ламона, в котором используется принцип отклонений и свободных колебаний одновременно. Принцип отклонений основывается на измерениях угла отклонения магнитной стрелки от линии магнитного меридиана в первом положении Ламона. Условие равновесия стрелки в этом случае выражается формулой (3), в которой два неизвестных: \bar{H} и M . Для нахождения одного из неизвестных используют принцип свободных колебаний, который заключается в том, что определяют период колебания отклоняющейся магнитной стрелки, свободно подвешенной на неупругой нити. Уравнение колебаний магнитной стрелки имеет вид

$$\bar{H}M = \frac{\pi^2 K}{t^2},$$

где K — момент инерции магнита; t — полупериод колебаний стрелки.

Решая это уравнение совместно с (3), можно найти горизонтальную составляющую. При вычислении H с помощью указанного способа вводят поправки за температуру и ход хронометра.

Для измерения модуля вектора \bar{T} применяют протонные и квантовые магнитометры. Протонные (ядерные) магнитометры основаны на измерении частоты прецессии протонов в магнитном поле. Как

известно, ядро атома, имеющее определенный магнитный момент, обладает способностью совершать вращательные движения (т. е. прецессировать) вокруг направления вектора магнитного поля \bar{T} с частотой ω , пропорциональной величине этого поля:

$$\omega = \gamma T,$$

где γ — величина постоянная, называемая гиромагнитным отношением (т. е. отношением магнитного момента ядра к механическому).

Конусообразное вращение ядра вокруг вектора \bar{T} подобно вращению волчка, получившего боковой удар, вокруг вертикальной оси. В качестве материала для создания эффекта прецессии используются жидкости, богатые протонами (вода, спирт и т. п.). Если сосуд с такой жидкостью поместить в катушку индуктивности, то в последней будет индуцироваться э. д. с. с частотой, равной частоте прецессии протонов. Однако в таком виде эта схема использована быть не может, так как амплитуда э. д. с. чрезвычайно мала и ее трудно зафиксировать. Для увеличения интенсивности сигнала используется вспомогательное поле. Сосуд с жидкостью помещают в катушку, в которой создается искусственное магнитное поле \bar{H} , много большее по величине вектора \bar{T} (более 100 Э), направленное перпендикулярно к нему. В этом случае магнитные моменты протонов ориентируются по направлению вектора \bar{H} . Время, в течение которого протоны поляризуются, составляет примерно 3 с.

Если затем выключить поле \bar{H} , вектор намагничивания будет стремиться ориентироваться теперь уже по направлению поля \bar{T} , совершая в процессе перехода от направления \bar{H} к направлению \bar{T} вращательные движения вокруг вектора \bar{T} с частотой ω . Амплитуда прецессионного движения характеризуется углом α между направлениями магнитного момента ядра и земного магнитного поля \bar{T} . Интенсивность сигнала (величина угла α) прямо пропорциональна величине поля \bar{T} , однако величина сигнала сохраняется лишь доли секунды, а затем быстро падает по экспоненциальному закону, достигая естественной величины. Однако этого времени оказывается вполне достаточно для измерения частоты с необходимой точностью.

Поскольку мерой измерения величины вектора \bar{T} является частота прецессии протонов, то при работе с протонными магнитометрами отпадает необходимость в строгом ориентировании и nivelировании прибора. Для установки прибора не требуется твердого грунта, поэтому он с успехом может использоваться при наблюдениях на неустойчивом основании (в песчаных, заболоченных районах). Показания приборов не зависят от изменения температуры и отличаются стабильностью нуля-пункта. Приборы

дают весьма высокую производительность и точность. Время наблюдения на одной точке составляет всего несколько секунд.

Основным недостатком протонных магнитометров является невозможность проведения непрерывных измерений вектора \vec{T} , что затрудняет их использование при аэромагнитных съемках. Применяющиеся протонные аэромагнитометры и ядерные приставки используются при воздушной съемке для дискретных замеров поля.

В настоящее время в практику магниторазведочных работ внедряются пешеходные протонные магнитометры, морские (МПМ), магнитометры для аэромагнитной съемки (протонные АМП-7, квантовые КАМ-28), магнитометры для автомобильной съемки (МСС). Схема любого ядерного магнитометра состоит из следу-

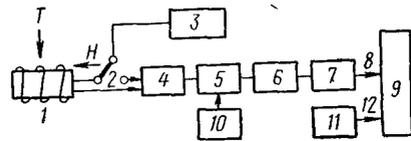


Рис. 13. Блок-схема ядерно-резонансного магнитометра АЯПМ-4

ющих основных узлов: 1) датчика, представляющего собой сосуд с протонсодержащей жидкостью и окруженный катушкой; 2) радиоканала, в котором происходит усиление, фильтрация и формирование сигналов; 3) частотомера; 4) записывающего устройства; 5) источников питания установки.

Рассмотрим принцип действия ядерно-резонансного магнитометра. Блок-схема прибора показана на рис. 13.

Чувствительным элементом прибора является цилиндрический сосуд 1, заполненный смесью воды со спиртом. Сосуд помещен в многovitковую катушку, используемую как для возбуждения (поляризации протонов), так и для приема сигналов э. д. с. определенной частоты, равной частоте прецессии протонов.

Перед измерением датчик устанавливается таким образом, чтобы ось цилиндра была перпендикулярна к направлению поля \vec{T} . Поляризация жидкости полем \vec{H} происходит под действием постоянного тока батареи 3 в течение 4 с. Затем катушка быстро переключается к электронной схеме прибора, после чего сигналы поступают на усилитель 4. Релейно-переключающее устройство 2 работает автоматически.

Измерение частоты сигнала производят путем подсчета числа периодов прецессии в течение определенного отрезка времени. Обычно для удобства записывают не саму частоту сигнала, а частоту биений $\Delta\omega$, равную разности частоты ω и эталонной частоты ω_1 ($\Delta\omega = \omega - \omega_1$), вырабатываемой специальным кварцевым генератором 10.

Смеситель 5 является каскадом, где происходит смешение сигналов от датчика и эталонного кварцевого генератора и выде-

ляются биения, частота которых равна разности этих частот. Фильтр 6 и катодный повторитель 7 служат для дальнейшего формирования сигналов, после чего они поступают на самописец 8, который фиксирует на бумажной ленте 9 биение сигналов. На этой же ленте с помощью второго самописца 12 подаются импульсы отметок времени, поступающие от кварцевого генератора 11. Запись показаний магнитометра автоматическая.

§ 16. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

При относительных измерениях определяют приращения вертикальной составляющей \vec{Z} , горизонтальной составляющей \vec{H} и модуля полного вектора \vec{T} . Измерения основаны на принципах магнитных весов (оптико-механические магнитометры) и феррозонда (феррозондовые магнитометры).

Чувствительным элементом вертикальных магнитных весов является магнитная стрелка, закрепленная на горизонтальной кварцевой или металлической нити. Центр тяжести стрелки смещается от его оси вращения таким образом, чтобы момент силы тяжести ее был направлен навстречу моменту сил составляющих геомагнитного поля. О величине поля судят по углу отклонения стрелки от исходного положения.

Пусть азимут плоскости качания стрелки составляет угол A (рис. 14). В этой плоскости на стрелку будут действовать вертикальная составляющая \vec{Z} и проекция горизонтальной составляющей $\vec{H} \cdot \cos A$. К магнитным полюсам соответственно будут приложены магнитные силы $m\vec{Z}$ и $m\vec{H} \cos A$, где m — магнитная масса полюса стрелки. Вращающий механический момент P_z , связанный с действием \vec{Z} -составляющей, имеет величину

$$P_z = 2m\vec{Z}l \cos i = M\vec{Z} \cos i,$$

где i — угол отклонения магнитной оси стрелки от горизонтали, M — магнитный момент стрелки.

Действия составляющих \vec{H} и \vec{Z} магнитного поля уравновешиваются суммой моментов силы тяжести стрелки P_p и упругих сил нитей подвеса P_ϕ . Момент силы тяжести P_p стрелки

$$P_p = Pd \cos(\beta - i),$$

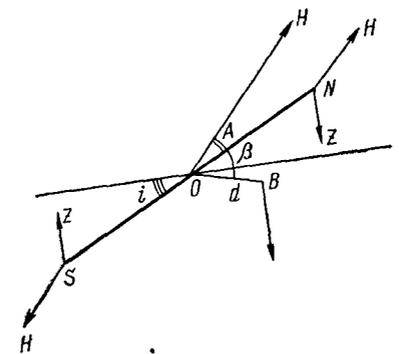


Рис. 14. Принцип действия вертикальных магнитных весов

где d — расстояние от центра тяжести системы до оси; i — угол наклона оси системы к горизонту; β — угол между линией OB и осью системы.

Момент упругих сил кручения нитей подвеса $P_\varphi = c\varphi$, где c — коэффициент кручения нити; φ — угол закручивания нити.

Положение равновесия стрелки определяется условием

$$P_Z = P_H + P_p + P_\varphi,$$

или

$$M\bar{Z} \cos i - M\bar{H} \cos A \sin i = Pd \cos(\beta - i) \pm c\varphi. \quad (5)$$

Итак, в уравнение равновесия входят \bar{H} - и \bar{Z} -составляющие. Чтобы при измерениях \bar{Z} избежать влияния горизонтальной составляющей поля, создают такие условия измерения, при которых либо $A = 90^\circ$, либо $i = 0$. В первом случае система магнитометра устанавливается широтно, во втором случае система выводится в горизонтальное положение. Полагая $A = 90^\circ$, запишем

$$M\bar{Z} \cos i = Pd \cos(\beta - i) \pm c\varphi.$$

После преобразований

$$\bar{Z} = \frac{Pd}{M} \cos \beta + \frac{Pd}{M} \sin \beta \operatorname{tg} i \pm \frac{c\varphi}{M \cos i}.$$

Обозначая

$$\frac{Pd}{M} \cos \beta = A, \quad \frac{Pd}{M} \sin \beta = B, \quad \frac{c\varphi}{M} = C,$$

получим

$$\bar{Z} = A + B \operatorname{tg} i \pm C \frac{1}{\cos i}.$$

Приращение вертикальной составляющей в двух точках 1 и 2 определится уравнением

$$\Delta Z = \bar{Z}_2 - \bar{Z}_1,$$

где

$$\bar{Z}_1 = A + B \operatorname{tg} i_1 \pm C \frac{1}{\cos i_1},$$

$$\bar{Z}_2 = A + B \operatorname{tg} i_2 \pm C \frac{1}{\cos i_2}.$$

Таким образом, полученная величина приращения вертикальной составляющей между двумя точками зависит только от угла отклонения магнитной оси системы от горизонта.

Чувствительным элементом горизонтальных весов является постоянный магнит, который устанавливается вертикально в плоскости магнитного меридиана. В этом случае наибольшее воздействие на весы будет оказывать горизонтальная составляющая магнитного поля.

В магнитометрах с компенсационной системой отсчета магнитная система на каждой точке измерений выводится в горизонтальное положение с помощью специальных компенсационных магнитов. При этом положении чувствительной системы действие \bar{H} -составляющей на нее сводится к нулю.

В уравнение равновесия (5), кроме магнитных моментов \bar{H} - и \bar{Z} -составляющих, момента силы тяжести, упругого момента нитей, войдет еще дополнительно магнитный момент компенсационных магнитов M_K , равный и противоположный по направлению моменту составляющей \bar{Z} . Запишем условие равновесия системы

$$M\bar{Z} \cos i - M_K \bar{Z}_K - M\bar{H} \cos A \sin i = Pd \cos(\beta - i) \pm c\varphi. \quad (6)$$

При $i = 0$, т. е. в момент компенсации, $H = 0$, моменты сил \bar{Z} и \bar{Z}_K равны, т. е. $M\bar{Z} = M_K \bar{Z}_K$, так что их результирующее действие равно нулю, а уравнение (6) примет вид:

$$Pd \cos \beta = \pm c\varphi.$$

В этом уравнении все его члены — постоянные величины, их можно рассчитать. Таким образом, мерой измерения вертикальной составляющей является поле компенсационных магнитов. На описанном принципе сконструированы магнитометры типа М-27. Простейший феррозондовый элемент представляет собой электрическую катушку с сердечником, питаемую переменным электрическим током. Сердечник феррозонда изготовлен из магнитомягкого материала пермаллоя, обладающего замечательной способностью мгновенно реагировать на быстрые изменения магнитного поля.

Существует несколько типов феррозондов. В магниторазведочной аппаратуре наиболее широкое применение нашли феррозонды по типу второй гармоники.

Чувствительный феррозондовый элемент типа второй гармоники состоит из двух одинаковых пермалловых сердечников 1 и 2 с обмотками возбуждения (рис. 15). Обмотки подключены к источнику переменного синусоидального напряжения (клеммы А и В) частотой $\omega = 500-1000$ Гц. Под действием переменного электрического тока, протекающего по обмоткам, в каждом сердечнике индуцируется переменное магнитное поле такой же частоты и формы. Обмотки возбуждения катушек соединены между собой последовательно, таким образом, чтобы магнитные поля в них при пропускании тока были противоположны. При отсутствии внешнего магнитного поля суммарная э. д. с. в измерительной цепи (клеммы С и D) будет равна нулю.

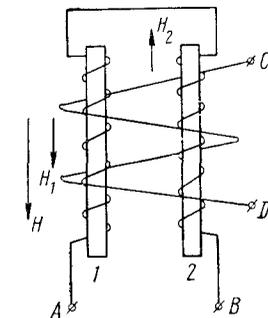


Рис. 15. Схема чувствительного феррозондового элемента

При наложении постоянной составляющей внешнего магнитного поля H в измерительной обмотке будет возникать электрический ток, причем направление этого тока в течение одного полу- периода совпадает с направлением поля в катушке 1 и противоположно полю в другой катушке, в связи с чем суммарное возбуждающее поле в катушке 1

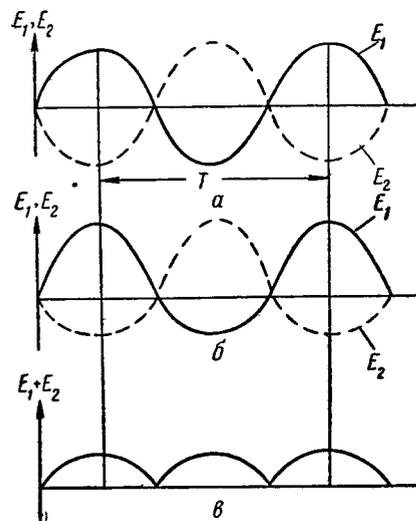


Рис. 16. Схема образования сигналов с удвоенной частотой

представлено суммой этих полей, а в катушке 2 — их разностью. В результате магнитная индукция в каждом из стержней изменится на одну и ту же величину, но в обратном направлении, и их разность будет колебаться уже с удвоенной частотой 2ω . Механизм образования колебаний с удвоенной частотой понятен из рис. 16. На рис. 16, а показаны симметричные кривые э. д. с. E_1 и E_2 , образующиеся соответственно в катушках 1 и 2 при отсутствии внешнего поля. На рис. 16, б изображены кривые э. д. с., когда на переменное электрическое поле накладывается поле Земли, а на рис. 16, в — результирующая кривая $E_1 + E_2$.

Феррозонды типа второй гармоники используются в аэромагнитометрах АММ-13 и АСГ-48М, а также в наземных магнитометрах М-17 и М-29.

§ 17. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ВИДОВ АППАРАТУРЫ ДЛЯ НАЗЕМНЫХ МАГНИТНЫХ СЪЕМОК

Для наземных магнитометрических наблюдений применяются оптико-механические (М-27, М-23, МВС и др.) и реже феррозондовые магнитометры (М-29 и другие).

Магнитная система прибора М-27 (рис. 17) состоит из постоянного магнита 1 с зеркалом 2, укрепленного на горизонтальной металлической нити 3. Подвижный магнит 1, отклоняющийся от горизонтали на угол, пропорциональный ΔZ , выводится в горизонтальное положение с помощью двух постоянных компенсационных магнитов 4 и 5. Поворачивая магниты, изменяют расстояние между центрами чувствительного элемента и компенсационного магнита, а тем самым — поле компенсации. С помощью измерительного магнита 4, жестко скрепленного со шкалой 6, поле компенсации измеряют плавно. Шкала имеет 600 делений, цена

одного деления $10 \pm 0,05$ гамм. Следовательно, с помощью магнита компенсации 4 и шкалы можно измерить абсолютную величину поля до 6000 гамм.

Магнит 5 (диапазонный) служит для расширения диапазона измерений поля, если измеряемое поле ΔZ превышает 6000 гамм. Этот магнит имеет ± 6 ступеней по 5000 ± 500 гамм, что позволяет расширить диапазон измеряемого поля по абсолютной величине до 72 000 гамм ($\pm 36 000$ гамм).

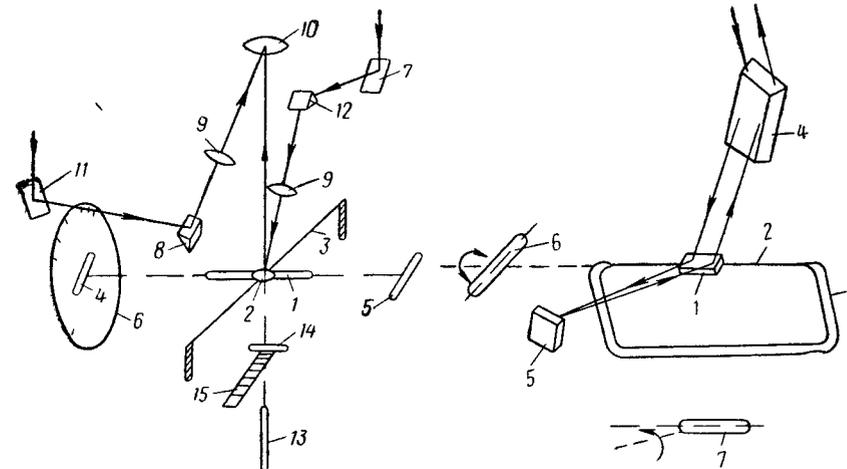


Рис. 17. Принципиальная схема магнитометра М-27

Рис. 18. Принцип действия магнитной вариационной станции

Оптическая схема прибора включает осветительные зеркала 7, 11, окуляр 10, объективы 9, призмы 8 и 12. Ход лучей на рис. 17 показан стрелками.

Магнит 14 (температурный), укрепленный на биметаллической пластине 15, служит для регулировки температурного коэффициента прибора, а магнит 13 (юстировочный) — для компенсации поля ΔZ , создаваемого магнитом 14. Магнитная система прибора для защиты ее от сотрясений и ударов в нерабочем состоянии арретируется. Все детали магнитометра смонтированы в литом металлическом немагнитном корпусе. К верхней части корпуса прибора крепятся зрительная труба с зеркалом подсветки, два цилиндрических и один круглый уровни, термометр.

На боковую поверхность корпуса прибора выведены ручки управления диапазоном и измерительным магнитами, стопорные гайки температурного и юстировочного магнитов, которыми пользуются только при настройке прибора. Шкала ступенчатой компенсации укреплена под ручкой диапазона магнита. Прибор устанавливается на треноге со столиком и может вращаться вокруг вертикальной оси на 360° . При переходе с одной точки наблюдений на другую прибор с треноги не снимается.

Магнитная вариационная станция СМВ-2 предназначена для непрерывной регистрации вариаций вертикальной или горизонтальной составляющих или модуля полного вектора \vec{T} .

Чувствительным элементом станции (рис. 18) является стержневой магнит I с зеркалом, укрепленный на кварцевой нити 2. При измерениях корпус прибора с помощью буссоли устанавливают так, чтобы чувствительный магнит занял одно из следующих положений: при измерениях вариаций Z -составляющей перпендикулярно к плоскости магнитного меридиана; при измерениях вариаций H -составляющей по меридиану; при измерениях вариаций модуля полного вектора \vec{T} по направлению вектора \vec{T} . Положение зеркальца, фиксирующего отклонение магнита под действием элементов геомагнитного поля, регистрируется с помощью оптической системы 4 и 5 в виде непрерывной записи на фотобумаге. Одновременно световой блик можно наблюдать визуально на вспомогательной шкале.

Кроме вариаций, на фотобумаге фиксируются нулевая линия, марки времени, изменение температуры в корпусе прибора с помощью зеркала, связанного с биметаллической пластиной. Масштаб записи вариации на фотобумаге может изменяться с помощью магнита 6 от 1 до 20 гамм/мм; соответственно диапазон измерений в зависимости от масштаба записи при ширине фотобумаги 1200 мм составляет от ± 100 до ± 2000 гамм. Настройка системы в нормальном магнитном поле района работ осуществляется с помощью магнита 7. Градуировка прибора осуществляется с помощью колец Гельмгольца, вмонтированных в корпус станции.

В комплект станции входит собственно станция, пульт управления и буссоль. Измерения со станцией производят в следующем порядке. Устанавливают штатив на землю или на специально вбитые колья и нивелируют по круглому уровню. На штатив устанавливают прибор. Затем его нивелируют, и с помощью буссоли задают нужную ориентировку. К прибору подключают пульт.

Перед началом измерений настраивают блоки, уточняют масштаб записи, выводят в определенное положение световые блики. Подготовку прибора заканчивают пуском лентопотяжного механизма. В журнале регистрируют номер станции, масштаб, время и место записи.

От оптико-механических магнитометров феррозондовые отличаются меньшей точностью. Однако эти магнитометры более производительны, с их помощью можно производить наблюдения при движении оператора на зыбких почвах, они более просты в обращении.

Магнитометр М-29 сконструирован на основе феррозонда по типу второй гармоники с компенсационной системой отсчета. Упрощенная блок-схема магнитометра показана на рис. 19, а.

Чувствительный элемент прибора — феррозонд I питается переменным электрическим током с частотой ω от генератора 7. Напряженность магнитного поля, складывающаяся с синусоидальными колебаниями магнитного поля, индуцируемого в обмотках возбуждения феррозонда, преобразуется в переменную э. д. с. с удвоенной частотой 2ω . Эти колебания далее усиливаются усилителем 2, выпрямляются фазочувствительным детектором 3 и поступают в цепь отрицательной обратной связи, где установлен стрелочный измерительный прибор 4, который измеряет силу тока в цепи. Прибор проградуирован в гаммах. На исходной точке величина поля компенсируется с помощью постоянного магнита 5,

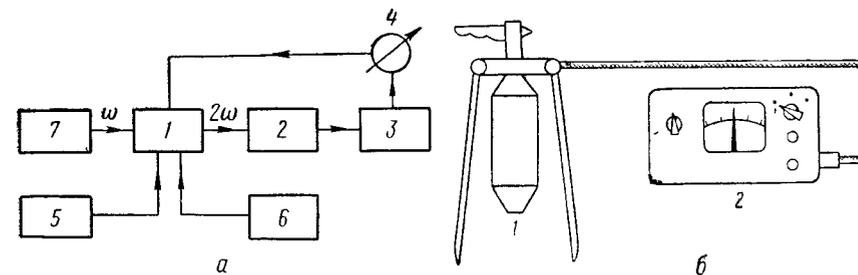


Рис. 19. Блок-схема (а) и внешний вид (б) феррозондового магнитометра М-29

вмонтированного в магнитоочувствительный блок прибора. На рядовых точках измеряется приращение ΔZ . Шкала прибора имеет ± 50 делений, цена деления имеет три положения 10, 50 и 200 гамм, которые используются в зависимости от величины измеряемого поля. Диапазон замеряемых ΔZ с помощью шкалы прибора составляет ± 500 гамм при цене деления 10 гамм, ± 2500 при цене деления 50 гамм и $\pm 10\,000$ гамм при цене деления 200 гамм.

Для расширения диапазона измеряемого поля в схеме предусмотрена ступенчатая компенсация поля, которая заключается в подаче постоянного тока в обмотку возбуждения датчика. Изменение силы и направления компенсационного тока осуществляется переключателем 6, имеющего одну нулевую и ± 5 токовых ступеней. Переключение на одну ступень равнозначно изменению отсчета на 100 делений. Диапазон измерений с примененной ступенчатой компенсации увеличивается до ± 3000 гамм при цене деления 10 гамм; $\pm 15\,000$ гамм при цене деления 50 гамм; $\pm 60\,000$ гамм при цене деления 200 гамм.

Конструктивно магнитометр оформлен в виде двух блоков (рис. 19, б). Феррозондовый датчик I , называемый магнитоочувствительным блоком, ориентируется по направлению Z -составляющей при помощи маятника, укрепленного на подвесе Кардана. Под действием силы тяжести датчик всегда занимает отвесное положение. В пульте прибора 2, называемом электронным

блоком, смонтированы все другие элементы схемы. Электронная схема пульта выполнена на полупроводниках. Блоки связаны соединительным кабелем. Питание прибора осуществляется от сухих элементов «Сатурн».

Для создания однородного магнитного поля, известного по величине и направлению, служит градуировочный комплект КГ-1. Он используется при эталонировке магниторазведочной аппаратуры. Градуировочный комплект состоит из колец Гельмгольца, пульта управления и подставок для установки колец на магнитометре. Кольца Гельмгольца состоят из двух круговых контуров радиуса R , расположенных параллельно друг другу на расстоянии, равном радиусу колец, с центрами на общей оси. Напряженность магнитного поля, индуцируемого внутри колец при пропускании по ним электрического тока, зависит от силы тока i , числа витков обмоток колец n и радиуса R . В центре системы напряженность поля определяется формулой $H_k = 0,899 (in/R)$, где $0,899 \cdot n = k$ — постоянная колец, которая строго определяется при их эталонировке и записывается в паспорт прибора.

Градуировочный комплект позволяет создавать эталонные поля от 150 до 60 000 гамм при напряжении источника питания 3 В и до 90 000 гамм при напряжении источника питания 6 В.

§ 18. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ МАГНИТОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

При подготовке магнитометров типа М-27 к полевым измерениям проверяют механическую исправность прибора, определяют цену деления шкалы, определяют и регулируют температурный коэффициент и уровни. Рассмотрим перечисленные операции.

Определение цены деления шкалы и ступени. Цена деления — это число гамм, приходящееся на одно деление шкалы. Чтобы ее определить, в центре системы с помощью колец Гельмгольца создают известное по величине магнитное поле. Разделив величину поля на число делений шкалы, соответствующее этому полю, получают цену деления.

Цену деления шкалы находим по формуле

$$\varepsilon = \frac{2ki}{n_1 - n_2},$$

где i — сила тока в кольцах Гельмгольца; n_1 и n_2 — отсчеты по шкале прибора при прямом и обратном направлении протекания тока; k — постоянная колец Гельмгольца.

Цену деления ступени $\varepsilon_{ст}$ определяют, зная цену деления шкалы ε и число делений Δn , на которое изменяется отсчет по шкале магнитометра при переключении ручки диапазонового механизма на одну ступень. Таким образом,

$$\varepsilon_{ст} = \varepsilon \Delta n.$$

Определение температурного коэффициента прибора. Температурный коэффициент находят, искусственно охлаждая или нагревая прибор в термокамере, после чего строят кривую зависимости показаний прибора от изменения температуры. Температурный коэффициент C_t находят по кривой как отношение изменения отсчета Δn в гаммах к разности температур:

$$C_t = \frac{\Delta n \varepsilon}{\Delta t},$$

где ε — цена деления шкалы прибора.

Если температурный коэффициент превышает допустимую величину, его регулируют с помощью магнита температурной компенсации.

Проверка и регулировка уровней. При измерениях вертикальной составляющей магнитного поля влияние \bar{H} -составляющей на показания прибора исключается лишь в том случае, когда его чувствительный элемент занимает строго горизонтальное положение. Горизонтальность чувствительного элемента определяется углом между его осью вращения (нитью подвеса) и горизонталью (угол α) и углом между магнитной осью магнита и горизонталью (угол i). Углы α и i должны быть минимальными. При нестройкой установке прибора показания магнитометра будут искажены влиянием \bar{H} -составляющей, причем величина искажения будет зависеть от углов α и i , а также от ориентировки прибора (азимута A). График зависимости измеряемого поля ΔZ на одной и той же точке в зависимости от азимута называется азимутальной кривой. При строгой настройке прибора, когда $\alpha = i = 0$, показания прибора не изменяются при различной его ориентировке по азимуту и кривая зависимости $\Delta Z = f(A)$ выражается прямой линией, параллельной координатной оси. При $\alpha \neq 0$ и $i \neq 0$ кривая по виду напоминает синусоиду.

Величину влияния угла α на показания прибора обнаруживают по расхождению отсчетов по шкале в азимутах 90° и 270°. Чтобы устранить полученное расхождение в отсчетах, прибор устанавливают в исходной ориентировке 90° и с помощью нивелировочных винтов добиваются по шкале показания, равного среднему из взятых отсчетов в азимутах 90° и 270°. В найденном положении прибора пузырек уровня, параллельного оси вращения системы, выводят на середину с помощью юстировочных винтов уровня. Операцию повторяют до тех пор, пока отсчеты при указанных ориентировках практически не будут различаться.

Определение горизонтальности магнитной оси системы (угла i) осуществляют, ориентируя прибор в азимутах 0° и 180°. Регулировку угла i производят аналогично предыдущему, установив прибор в исходную позицию 0° и добиваясь по шкале прибора

отсчета, равного среднему из отсчетов в азимутах 0 и 180°. Найденное положение закрепляют с помощью второго уровня.

После регулировки уровней строят азимутальную кривую по отсчетам в различных азимутах через 30, 45 или 90°. По кривой определяют участок, на котором показания прибора зависят от его ориентировки в наименьшей степени.

Наблюдения с магнитометром М-27 выполняют в следующем порядке.

Прибор устанавливают над точкой наблюдения. Ориентируют «на глаз». Точность ориентировки зависит от качества регулировки уровней.

Прибор нивелируют по уровням. Дезарретируют систему и, вращая ручку измерительного магнита, подводят риски подвижного индекса симметрично относительно нулевой линии на шкале. Снимают показания прибора и записывают их в журнале, где указывают также номер точки наблюдения, время, температуру, ориентацию прибора, положение переключателя диапазонного механизма.

После взятия отсчета прибор арретируют и, не снимая с треноги, переносят на следующую точку наблюдения.

При подготовке феррозондовых магнитометров к работе проверяют питание, уточняют механический нуль прибора, компенсируют Z_0 , выводя стрелку прибора на нуль с помощью компенсирующего магнита. Затем проверяют вертикальность магнитной оси магниточувствительного элемента, беря отсчеты в различных азимутах. Регулировку негоризонтальности оси осуществляют с помощью грузиков на конце маятника.

Цену деления шкалы прибора определяют с помощью градуировочных колец.

Измерения производят обычно два человека: оператор и помощник. Оператор несет электронный блок, укрепленный на груди, помощник — магниточувствительный блок. При измерениях последний устанавливают на треноге, при этом электронный блок должен быть отнесен на всю длину кабеля. Далее освобождают фиксатор корпуса МЧБ с тем, чтобы он мог принять вертикальное положение, дезарретируют маятник и берут отсчет.

На участке работ, обычно вблизи стоянки отряда, выбирается контрольный пункт, который служит для контроля за техническим состоянием приборов и в качестве исходной точки, относительно которой определяют приращение поля в точках участка. Для обеспечения единого уровня съемок, выполняемых в разные годы и на разных площадях, контрольные пункты привязывают к пунктам ИЗМИРАНа, где известно абсолютное значение поля.

Контрольные пункты обычно выбирают в спокойном нормальном магнитном поле. При этом необходимо учитывать условия подхода, подъезда и отсутствие помех.

Для повышения точности работ на участке создается вспомогательная опорная сеть, создание которой вызвано нестабиль-

ностью существующей аппаратуры. Все магнитометры, кроме протонных, обладают тем недостатком, что под действием внешних условий и других причин меняется место нуля отсчетного устройства, что может привести к грубым ошибкам. Линейный характер смещения нуля у аппаратуры наблюдается только в течение нескольких часов. Поэтому опорная сеть создается с таким расчетом, чтобы продолжительность рядовых рейсов, которые начинаются и заканчиваются на точках опорной сети, не превышала 2—3 ч. Опорные точки распределяют по площади работ равномерно, обычно по магистралям.

Точность создания сети опорных пунктов в 2—4 раза превышает точность рядовых наблюдений. Схемы рейсов по созданию опорных сетей могут быть различными, но все они опираются на один или несколько пунктов с известным значением поля.

Рядовые наблюдения, как правило, выполняют по однократной методике. Контрольные наблюдения выполняют по диагональным профилям, охватывающим первичные наблюдения, выполненные в различные дни.

Наблюдения по интерпретационным профилям с целью получения более полной характеристики аномального поля осуществляют особенно тщательно. Как правило, на таких профилях точки наблюдения располагаются гуще, чем при рядовых рейсах, а в местах интенсивных аномалий или сложного поля сеть может стучаться еще более. Интерпретационные профили в своих концевых частях должны выходить в нормальное поле.

§ 19. КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ НАЗЕМНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

Камеральную обработку полевых магниторазведочных наблюдений можно разделить на следующие этапы: 1) обработка результатов создания контрольных пунктов и опорной сети; 2) обработка рядовой сети; 3) построение планов изодинам и графиков Z_a . Общая формула для вычисления аномального значения поля в точке имеет вид:

$$Z_a = Z_{a, н} + \Delta Z - \Delta Z_{н, п} - \Delta Z_{н, г} - \Delta Z_{в},$$

где $Z_{a, н}$ — аномальное значение поля в исходной точке (известное); ΔZ — значение приращения поля между точками; $\Delta Z_{н, п}$ — поправка за смещение нуляпункта; $\Delta Z_{н, г}$ — поправка за нормальный градиент; $\Delta Z_{в}$ — поправка за вариации.

Величину приращения поля ΔZ вычисляют по формуле

$$\Delta Z = \varepsilon (n - n_0) + P_{ст},$$

где ε — цена деления шкалы, гамм/дел; n_0 — начальный отсчет на исходной точке; n — отсчет в точке измерения, $P_{ст}$ — поправка за ступенчатую компенсацию поля, величина которой определяется знаком и номером позиции переключателя ступеней.

Схема вычисления Z_a на точках опорной и рядовой сети одна и та же и отличается лишь тем, что в точки рядовой сети не вводят поправку за нормальный градиент, так как при широтной ориентировке профилей эта поправка незначительна и учитывается поправкой за нульпункт.

Величину смещения нульпункта находят путем сравнения известного значения приращения поля между опорными точками с полученным приращением в рядовом рейсе. При этом в зависимости от схемы рейса поправка за нульпункт вычисляется по-разному.

В случае, если рейс начинался и заканчивался на одной и той же опорной точке, величина нульпункта определяется путем умножения разности первичного n_1 и повторного n'_1 отсчетов на этой точке на цену деления:

$$\Delta Z_{н.п} = (n_1 - n'_1) \varepsilon.$$

В случае, когда рейс опирается на две различные опорные точки, между которыми известно приращение поля ΔZ , то величину нульпункта находят, сравнивая ΔZ и $\Delta Z'$, полученные в рядовом рейсе: $\Delta Z_{н.п} = \Delta Z - \Delta Z' = \Delta Z - \varepsilon (n_1 - n_2)$, где n_1, n_2 — отсчеты по шкале магнитометра на точках опорной сети.

Для характеристики смещения нульпункта применяют коэффициент K , определяющий скорость изменения нульпункта в единицу времени Δt : $K = \Delta Z_{н.п} / \Delta t$. Зная продолжительность рейса Δt и $\Delta Z_{н.п}$, находят коэффициент K , а поправку за нульпункт в какой-либо точке рейса определяют путем умножения коэффициента K на разницу во времени взятия отсчетов на данной точке и исходной опорной. Удобнее и быстрее поправку за смещение нульпункта вводить графически.

Для построения графика по оси абсцисс откладывают в удобном для пользования масштабе время, показывающее начало и конец рейса. Затем проводят прямую, нулевая ордината которой совпадает с началом рейса, а конечная ордината равна величине нульпункта в гаммах. Поправку в промежуточные точки вводят путем линейной интерполяции.

Поправку за нормальный градиент в точках опорной сети находят с помощью карт нормального поля. Для этого точки наблюдений наносят на карту нормального поля и определяют расстояние между двумя точками по перпендикуляру к изолиниям. Это расстояние, выраженное в гаммах, и будет поправкой за нормальный градиент. При пользовании картами нормального поля, год издания которых не совпадает с годом проведения магнитной съемки, величину поправки за нормальный градиент исправляют за вековой ход. Поправку за вековой ход определяют, умножая величину векового хода на разницу между годом проведения съемки и годом составления карты.

Поправку за вариации снимают с магнитограмм суточных вариаций, получаемых на магнитных обсерваториях. Если вариации

измеряли с помощью полевых приборов, то строят кривую изменения \bar{Z} -составляющей во времени, и по ней определяют поправку соответственно времени взятия отсчета. Часто, когда поправки за вариации незначительны и изменяются по линейному закону, их отдельно не вводят, так как они учитываются поправкой за смещение нульпункта.

Результаты полевых магниторазведочных работ представляют в виде карт фактического материала, карт графиков Z_a и планов изодинам Z_a . Все эти карты обычно составляют в масштабе съемки. На карту фактического материала выносят сеть наблюдений и значения Z_a в каждой точке. Для наглядности на плане изодинам положительную часть поля закрашивают синим цветом, отрицательную — красным. Нормальное поле закрашивается желтым цветом.

§ 20. АЭРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА

1. Принцип работы аэромагнитометров

Аэромагнитометры — это приборы, записывающие изменение магнитного поля Земли в процессе полета самолета или вертолета. Аэромагнитометры состоят из чувствительного элемента — датчика и усилительно-регистрирующей аппаратуры. Кроме датчика имеются устройства для измерения высоты полета и привязки маршрута к координатам местности.

В качестве чувствительных элементов используются феррозондовые или ядерные датчики. Первые регистрируют приращение модуля вектора \bar{T} , вторые — полную величину модуля \bar{T} земного магнитного поля. В феррозондовых аэромагнитометрах запись непрерывна, в ядерных — дискретная. Диаграмма ядерных аэромагнитометров состоит из отдельных точек графика изменения поля, наносимых через некоторый интервал времени (от 0,8 до 5 с).

Для измерения феррозондом какой-либо составляющей магнитного поля необходимо ось чувствительного элемента ориентировать по направлению действия измеряемой компоненты.

В первых аэромагнитометрах были сделаны попытки ориентировать измерительный магниточувствительный элемент (ИМЧЭ) по вертикали, т. е. измерять \bar{Z} -составляющую. Но это оказалось нелегким делом, и точность измерений не превысила 800—500 гамм. Оказалось, что легче всего ориентировать ИМЧЭ по вектору \bar{T} земного магнитного поля и измерять в процессе полета приращение его модуля. Установка ИМЧЭ (рис. 20) по вектору \bar{T} выполняется автоматически с помощью двух пар ориентирующих магниточувствительных элементов ОМЧЭ, установленных на площадке S перпендикулярно к ИМЧЭ. Последняя укреплена на оси O_1 вилки B и может поворачиваться с помощью сервомотора M_1 . Вилка поворачивается вокруг оси O_2 с помощью сервомотора M_2 .

Когда *ИМЧЭ* ориентирован строго по вектору \vec{T} , магнитное поле не влияет на элементы *ОМЧЭ*, ибо составляющая, перпендикулярная к вектору \vec{T} , равна нулю. При отклонении оси *ИМЧЭ* от направления вектора в измерительных обмотках *ОМЧЭ* возникают сигналы за счет составляющих вектора \vec{T} , которые усиливаются и приводят в движение сервомоторы M_1 и M_2 . Последние вращают площадку и вилку вокруг соответственно осей O_1 и O_2 до тех пор, пока *ИМЧЭ* не будет ориентирован по вектору \vec{T} .

Наиболее совершенными феррозондовыми приборами являются аэромагнитометры АМ-13 и АММ-13. Их различие состоит в том, что в первом приборе гондола с магниточувствительными элементами буксируется на кабеле и выпускается в полете с помощью

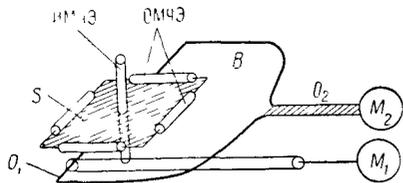


Рис. 20. Схема ориентирующей системы датчика аэромагнитометра АММ-13

специальной лебедки, а гондола прибора АММ-13 устанавливается жестко на стабилизаторе самолета. На показания прибора АММ-13 не влияет изменяющееся в зависимости от курса магнитное поле самолета (девиация). В приборе АММ-13 это влияние значительно, поэтому для исключения его имеется дополнительно компенсатор курсовых помех. Точность прибора АМ-13 (± 7 гамм) несколько выше, чем у магнитометра АММ-13 (± 10 гамм). Кроме того, наличие выпускной гондолы дает возможность снижать высоту датчика над поверхностью земли. Вместе с тем выпускная гондола создает опасность для самолетовождения, особенно на низких высотах и в горной местности.

Блок-схема аэромагнитометра представлена на рис. 21. Сигналы от *ОМЧЭ* подаются на усилительно-преобразовательную схему *УПС*, с помощью которой через реверсивные двигатели выполняется ориентация *ИМЧЭ*. Сигналы с датчика поступают на преобразовательную схему *ПС*, в которой они усиливаются, выпрямляются и преобразуются в переменный ток, управляющий двигателем *Д*. Двигатель перемещает контакт *К* компенсационного реохорда *Р*. Через реохорд от батареи *Б* протекает некоторый ток i , величину которого регулируют сопротивлением чувствительности R . Компенсирующее напряжение ΔU_k на участке r_1 реохорда равно $\Delta U_k = ir_1$. Если измеряемая величина ΔU_c сигнала равна величине ΔU_k , тогда ток в контуре I отсутствует, двигатель *Д* находится в покое. Как только возникло неравенство величин ΔU_k и ΔU_c , в контуре I возникает ток, который приводит двигатель *Д* в движение. Последний перемещает ползунок *К* по реохорду до тех пор, пока ΔU_c не будет равна ΔU_k . Таким

образом, отклонение ползунка *К* пропорционально величине изменения внешнего поля \vec{T} . С ползунком *К* механически связано перо *П*, которое на ленте записывает в процессе полета диаграмму поля \vec{T} .

Для того чтобы скомпенсировать начальную постоянную составляющую поля Земли, в приборе имеется компенсатор начального поля *КНП*, с помощью которого можно компенсировать поле величиной от $-0,3$ до $-0,7$ Э и тем самым устанавливать нулевое положение записи прибора. Запись магнитного поля ведется в масштабах 2 и 10 гамм/мм, подстройка которых выполняется сопротивлением R .

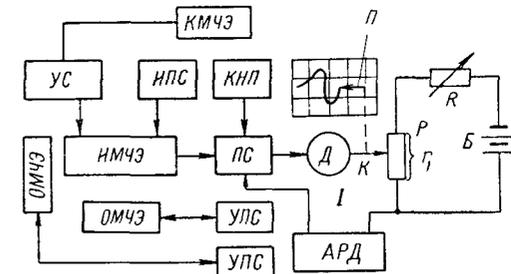


Рис. 21. Блок-схема феррозондового аэромагнитометра

Так как ширина записи магнитного поля ленты равна 220 мм (± 110 мм), следовательно, указанные масштабы позволяют записывать поле в пределах ($\pm 220-1100$) гамм. Чтобы можно было зарегистрировать поле большей интенсивности, в схеме прибора имеется автоматический расширитель диапазонов *АРД*, позволяющий увеличить диапазон до $\pm 11\ 000$ гамм. Его действие заключается в следующем. Как только ползунок *П* достигает конца реохорда, *АРД* замыкает контакты реле, с помощью которого в контур I включается добавочное сопротивление r_1 , ослабляющее ток в контуре I и тем самым величину ΔU_c , поступающую на реохорд. Это позволяет величиной ΔU_k скомпенсировать большую величину измеряемого сигнала, т. е. расширить диапазон.

Питание компенсационных цепей прибора осуществляется от батарей, помещенных в термостат, стальные цепи схемы прибора питаются от преобразователя, подключенного к бортовой сети.

При работе с прибором АММ-13, гондола которого установлена на стабилизаторе, результаты измерений искажаются влиянием магнитного поля самолета. Оно обусловлено остаточной намагниченностью самолета (постоянной составляющей) и индуктивной намагниченностью самолета, возникающей под влиянием поля ΔT , зависящей от курса самолета. Составляющую поля, возникающую в результате действия остаточной намагниченности, компенсируют с помощью подачи от стабилизированного источника питания *ИПС* постоянного тока в три взаимноперпендикулярные катушки, установленные в гондоле вблизи *ИМЧЭ*. Индуктивная составляющая

компенсируется сигналами от специального феррозонда магнитометра *ИМЧЭ*, установленного в хвостовой части самолета вдоль его оси. Сигналы через усилительную схему *УС* подаются в систему двух взаимноперпендикулярных катушек, установленных также вблизи *ИМЧЭ*.

На ленте магнитометров, кроме записи величины ΔT , наносятся через 15 или 30 с марки времени, регистрируется высота полета от радиовысотомера, отмечаются ориентиры для привязки маршрутов. Общая рабочая ширина диаграммной ленты — 280 мм. На отрезке 220 мм записывается магнитное поле, на остальной части — высота полета в диапазоне от 25 до 120 м. Лентопротяжный механизм протягивает ленту со скоростью 1,6; 3,2 и 8 м/ч.

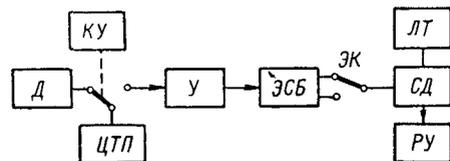


Рис. 22. Блок-схема ядерного аэромагнитометра

Смещение нуля прибора при постоянной температуре — не более 5 гамм/градус. Температурный коэффициент — 3 гамм/градус. Скорость записи магнитного поля при масштабе 2 гамм/м составляет 200 гамм/с или 10 см/с.

К ядерным аэромагнитометрам относятся протонные приборы АЯАМ-6, АМП-7, а также ядерная цифровая приставка ЯЦП. Они регистрируют абсолютную величину модуля вектора T с точностью до ± 2 гамм. Нульpunkt ядерных магнитометров стабилен. Запись ведется в виде дискретных точечных замеров через 2—5 с в приборах АЯАМ-6 и ЯЦП и через 0,8 с в приборе АМП-7.

Принцип работы протонных магнитометров был рассмотрен в § 15. Блок-схема ядерного аэромагнитометра АЯАМ-6 приведена на рис. 22.

Датчик прибора *Д* с помощью коммутационного устройства *КУ* подключается поочередно к цепи тока поляризации *ЦТП* (через кабель) и к усилителю *У* измерительной схемы. С выхода усилителя сигнал по кабелю передается в электронно-счетный блок *ЭСБ*. К его выходу подключен электронный ключ *ЭК*, который в течение строго фиксированного интервала времени подсоединяет к счетным декадам *СД* выход *ЭСБ*. Величина измеряемого сигнала, пропорциональная частоте ядерной прецессии, в виде стандартных импульсов фиксируется на ламповом табло *ЛТ*. Кроме того, она поступает на регистрирующее устройство *РУ*, где наносится в виде точки графика, отстоящей от нулевой линии на расстоянии, пропорциональном частоте прецессии. На ленту прибора наносятся также марки времени, метки ориентиров и высота полета.

Аэромагнитометр АЯАМ-6 применяют для создания опорной сети и обычной съемки в мелких масштабах. Датчик прибора бук-

сируется в выпускной gondole на немагнитном тросе. Широкому внедрению прибора для крупномасштабной съемки препятствует сравнительно большой период повторения измерений, равный 2 и 4 с. При скорости 180 км/ч самолет АН-2 пролетит за 2 с 100 м, значит, аномалии шириной 100—200 м могут быть пропущены или записаны по редкой сети точек. В этом смысле более широкими возможностями обладает аэромагнитометр АМП-7, измерение которым повторяются через 0,8 с. Принцип его работы аналогичен действию прибора АЯАМ-6.

В практике применяются ядерные приставки и феррозондовые аэромагнитометры. Практически они представляют собой протонный магнитометр, установленный на самолете или вертолете вместе с феррозондовым прибором. Последний регистрирует изменения магнитного поля непрерывно, а ядерные приставки включаются через некоторые интервалы времени (10, 15 и 20 мин) и фиксируют отсчеты абсолютных значений поля, которые необходимы для учета смещения нуля пункта феррозондового аэромагнитометра и привязки его показаний к единому абсолютному уровню поля. Наибольшее применение нашли ядерные приставки ЯЦП с цифровым печатающим регистратором.

К вспомогательным устройствам относятся приборы, позволяющие определить высоту полета самолета и его координаты, т. е. осуществить привязку наблюдений к местности. Высота полета воздушного корабля над землей определяется с помощью радиовысотомера РВ-2. Измерение высоты основано на изучении явления отражения ультракоротких радиоволн УКВ от земной поверхности.

Для привязки съемочных маршрутов при наличии хороших ориентиров местности применяют аэрофотоаппараты АФА, а в местах, где такие ориентиры отсутствуют (на Крайнем Севере, в пустынях и степях), применяют специальные радионавигационные системы.

2. Методика и техника аэромагнитной съемки

Перед началом полевых работ проверяют исправность аппаратуры, выполняют градуировку магнитометра и высотомера, настройку компенсатора курсовых помех. Градуировка магнитометров АМ-13 и АММ-13 заключается в настройке показаний прибора соответственно разграфке диаграммной ленты.

Для масштаба записи 2 гамм/м на ленте произведена разграфка значений поля от нулевой линии через 20 гамм. Установив нулевое положение записи, *ИМЧЭ* помещают в кольцо Гельмгольца и, задавая в них поле, равное +200 гамм, с помощью реостата чувствительности, выводят перо на линию «+200», затем меняют направление поля колец и устанавливают перо на линии «-200». Для градуировки второго диапазона в кольцах создают поле 2000 гамм. После такой градуировки разграфка ленты служит отсчетной шкалой поля.

С целью градуировки радиовысотомера над равной площадкой (аэродромом) проводят несколько маршрутов на высотах 10, 20, 40, 60 м и т. д., отсчитывая их по барометрическому высотомеру на ленте пером высотомера РВ-2. По результатам маршрутов строят график, откладывая по оси абсцисс высоту над аэродромом, по оси ординат — отклонение пера высотомера l от линии показаний на земле. С помощью этого графика и определяют высоту полета самолета на съемочных маршрутах.

При работе с прибором АММ-13 настраивают компенсатор курсовых помех. Это делается в нормальном магнитном поле при полете через одну точку в прямом и обратном направлениях по курсам через 45° . Смысл настройки состоит в том, чтобы при полете через точку разница показаний на ней при прямом и обратном курсах не превышала ± 4 гамм. Это достигается регулировкой компенсационного тока в катушках гондолы с помощью соответствующих потенциометров, установленных на пульте компенсатора курсовых помех.

Аэромагнитную съемку обычно выполняют в масштабах от 1 : 1 000 000 до 1 : 10 000. Высота полета самолета выбирается приблизительно в 3—4 раза меньшей расстояния между маршрутами, но не менее 150 м.

Чтобы высоту полета сохранить постоянной, что необходимо для сопоставимости графиков поля, съемка выполняется методом «обтекания» форм рельефа, при котором траектория полета самолета поддерживается параллельной рельефу дневной поверхности. Если работа ведется без ядерной приставки, то съемку территории начинают с создания опорной сети в виде системы замкнутых каркасов с привязкой на государственные опорные пункты.

Каждое звено каркаса создается замкнутыми циклами. Уравнивание каркасов и получение абсолютных значений поля в узловых точках производится аналогично тому, как это описано для наземных гравиметровой или магнитной съемок. После получения абсолютных значений поля в этих точках строят графики абсолютных значений по связям. Расстояние между магистральными опорными маршрутами выбирается таким образом, чтобы рядовой маршрут через каждые 20—30 мин полета (60—90 км) пересекал опорный магистральный маршрут.

Местоположение опорных маршрутов с помощью аэрофотоснимков выносят на топопланшеты, на которых штурман намечает местоположение рядовых съемочных профилей. Примерно через 10—15 км маршрута штурман намечает и нумерует на карте характерные ориентиры. Для ежедневного контроля стабильности нуля прибора и точности показаний в нормальном поле выбирается контрольный маршрут. В начале рабочего вылета при полете по контрольному маршруту бортоператор устанавливает нулевое положение пера, в конце рабочего дня записывает имеющееся положение нуля и определяет смещение нуля. Оно должно

быть не более порядка величины, указанной в паспорте прибора, что является одним из показателей его исправной работы.

После наблюдения на контрольном маршруте штурман направляет самолет к началу рядового маршрута. При подходе к нему штурман предупреждает об этом по радиации бортоператора и фотографа.

В момент прохождения ориентира по сигналу штурмана или бортоператора аэрофотограф нажимает спусковое устройство АФА и выполняет серию (3—5) снимков. Момент выполнения каждого снимка фиксируется отбросом пера записи высоты. Штурман при прохождении самолета над ориентиром нажимает кнопку на пульте отметчика ориентиров, и штемпельный механизм печатает на ленте номер ориентира. Он же является номером произведенной серии снимков. Аналогично отмечают другие ориентиры, а также выполняется серия снимков при пересечении рядовым маршрутом опорного. Если местность бедна хорошо заметными ориентирами, то между магистральными маршрутами параллельно им прокладывается ряд полос со сплошным фотографированием местности. В дальнейшем при пересечении рядовым маршрутом данных полос также выполняют серию аэрофотоснимков.

В процессе съемки бортоператор следит за работой прибора, а также ведет визуальное наблюдение местности, отмечая на ленте наличие и характер обнажений и другие особенности, которые часто бывают хорошо заметны с высоты полета.

Когда на ленте зафиксирована аномалия, бортоператор сообщает штурману о необходимости ее детализации, которая выполняется по линиям нескольких залетов, параллельным маршруту, и по простирацию аномалии. Эпицентр аномалии фиксируют серией аэрофотоснимков, а на землю выбрасывают яркий вымпел. Нередко при детализации выполняют полеты через эпицентр аномалии на различных высотах, чтобы проследить характер ее затухания. Это помогает выделить рудную аномалию на фоне нерудных аномалий. Градиент затухания рудной аномалии обычно больше.

После завершения полета диаграммную ленту оператор сдает начальнику легкого отряда и начальнику камерального бюро, а фотоленту — в фотолaborаторию для проявления.

3. Обработка результатов аэромагнитной съемки

Обработку начинают с вычисления абсолютных значений модуля вектора \bar{T} в пунктах опорной сети. С этой целью сначала определяют исправленные за смещение нуля прибора приращения между соседними опорными пунктами по формуле

$$\Delta_{2-1} = \Delta T_2 - \Delta T_1 - \frac{\Delta_n}{\Delta t} t_{2-1},$$

где Δ_{2-1} — приращение поля на пункте 2 по отношению к полю пункта 1; ΔT_1 и ΔT_2 — величины поля, отсчитанные по разграфке диаграммной ленты в точках записи, соответствующих пунктам 1 и 2; $\Delta_{\text{нп}}$ — смещение нуля прибора, равное разности показаний прибора, полученных под пунктом 1 при повторном и первоначальном прохождении под ним самолета;

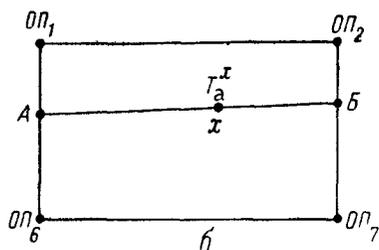
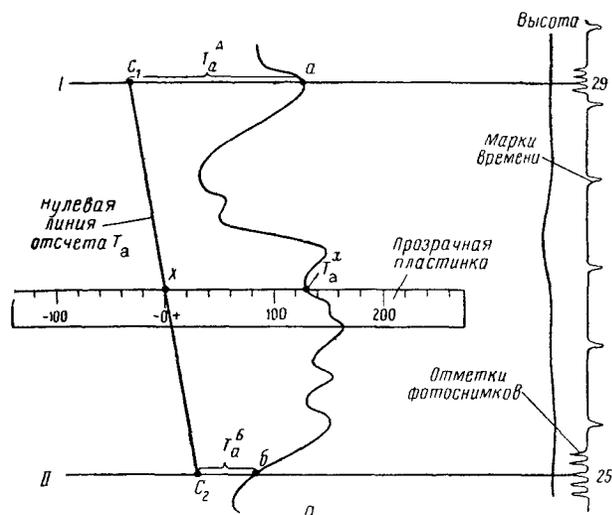


Рис. 23. Схема обработки аэромагнитной ленты (а) и аномальных значений (б)

Δt — время, прошедшее между полетами под опорным пунктом 1; t_{2-1} — время полета самолета между пунктами 1 и 2.

После нахождения приращений поля по всем связям каркаса их уравнивают подобно тому, как это выполняется в наземной магнитной съемке, после чего на опорные точки передают абсолютные значения \bar{T} с опорных пунктов государственной сети.

Далее, вычитая из абсолютных значений модуля вектора \bar{T} значения нормального магнитного поля, определяют в пунктах опорной сети величины аномального магнитного поля T_a .

Затем для опорных и рядовых маршрутов определяют значения T_a в точках между опорными пунктами. Предположим, что на диаграммной ленте (рис. 23, а) ориентиры I и II соответствуют

опорным пунктам А и В. Опорные пункты опознаны на центрах аэрофотоснимков соответственно 29 и 25. Проведя через метки фотоснимков горизонтальные линии, получим точки а и б, которым соответствуют аномальные значения поля T_a^A и T_a^B .

Далее отложим от точки а в масштабе диаграммы отрезок, равный T_a^A и получим точку C_1 . Аналогичным образом от точки б отложим отрезок, равный T_a^B , и получим точку C_2 . Если величина T_a^A (или T_a^B) положительная, то отрезок откладывается влево. При отрицательной величине аномального поля отрезок откладывается вправо. Точки C_1 и C_2 соединяем прямой линией. Она и будет нулевой линией отсчета аномальных значений поля между пунктами А и В.

Для нанесения на топографическую основу местоположения пункта А (рис. 23, б), над которым получена серия снимков, снимок 29, соответствующий опорному пункту ОП, опознают на планшете. Переносят на планшет три характерные точки снимка и путем геометрических построений определяют на нем центр снимка. Он и будет искомым точкой А. Аналогично этому выносят на планшет точку В, которая совпадает с центром снимка 25. Между точками А и В планшета разбивают шкалу расстояний в километрах, отсчитывая их от точки А. Аналогичную шкалу расстояний разбивают между точками C_1 и C_2 (рис. 23, а), начиная от точки C_1 , с помощью пропорциональной лучевой палетки. Затем на полоске бумаги или плексигласовой пластинке разбивают с помощью вертикальных линий разграфки ленты шкалу отсчета поля. Далее в точках x, где кривая записи принимает экстремальные значения, определяют по шкале значения T_a^x и переносят их в виде цифр на шкалу расстояний топографического планшета (рис. 23, б). Нулевое деление шкалы при взятии отсчетов T_a совмещают с линией C_1, C_2 . По вынесенным значениям строят планы изолиний или графики T_a .

Обработка магнитограммы значительно упрощается, если полевые работы выполнены с применением ядерной приставки, позволяющей получить абсолютные значения модуля вектора \bar{T} на опорных точках.

§ 21. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ

Для изучения магнитных свойств пород и руд района, знание которых необходимо для геологической интерпретации результатов магнитных съемок, в процессе полевых работ проводится отбор образцов из обнажений и керна скважин. Магнитную восприимчивость образцов и их остаточную намагниченность измеряют с помощью специальных приборов и в первую очередь — астатического магнитометра МА-21.

Чувствительным элементом магнитометра МА-21 является астатическая система, состоящая из двух подвешенных на упругой

нити стержневых магнитов. Их магнитные моменты равны и противоположно направлены. Такая система не реагирует на внешнее однородное поле, так как вращающие моменты, действующие на верхний и нижний магниты, компенсируют друг друга.

Перед началом измерений систему ориентируют таким образом, чтобы оси магнитов располагались в плоскости магнитного меридиана. Образец при этом может занимать два положения: 1) на уровне нижнего магнита в первом положении Гаусса (рис. 24, а) так, чтобы линия, соединяющая центры магнита и образца, оказалась широтной; 2) на уровне центра астатической системы, на равном расстоянии от центров обоих магнитов (рис. 24, б). В пер-

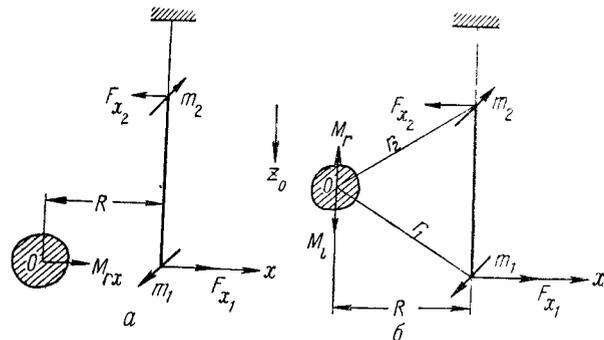


Рис. 24. Принцип действия астатического магнитометра МА-21

вом положении образца измеряют момент M_r остаточной намагниченности, во втором положении — моменты M_r и M_i остаточной и индуктивной намагниченности. Зная магнитные моменты образцов, их объемы, величину намагничивающего поля, можно определить составляющие векторов J_r и J_i .

Для измерения момента M_r расположим образец на уровне нижнего магнита так, чтобы одна из его осей, например Ox , была направлена к системе по линии, соединяющей центры образца и магнита (рис. 24, а). В этом случае на магниты действует горизонтальная составляющая магнитного момента образца M_{rx} , а действие других составляющих при строгой установке образца будет равно нулю. Индуктивная составляющая земного магнитного поля при этом не влияет на результаты измерений, так как астатическая система устанавливается в плоскости магнитного меридиана, а измеряемая составляющая момента образца располагается в широтной плоскости.

Под действием магнитного момента образца в центрах верхнего и нижнего магнитов возникнут векторы напряженности поля F , горизонтальные составляющие которого F_{x1} и F_{x2} противоположно направлены. Под действием разности сил $F_{x1} - F_{x2} = F_x$ система закрутится на некоторый угол, который фиксируют с помощью отсчетного устройства.

При измерениях составляющих магнитного момента образца M_{ry} и M_{rz} образец поочередно располагают так, чтобы ось Oy , а затем ось Oz были направлены к системе. При измерениях составляющих остаточной намагниченности берут два отсчета n_1 и n_2 : отсчет n_1 берется, когда ось Ox направлена перпендикулярно к системе, и n_2 , когда образец разворачивается вокруг вертикали на 180° .

Составляющая

$$M_{rx} = \frac{n_1 + n_2}{2} E_m,$$

где E_m — цена деления прибора в единицах намагниченности для фиксированного расстояния m .

Часто для повышения точности измерений берут еще два отсчета по прибору, поворачивая образец вокруг горизонтальной оси на 180° . Составляющие M_{ry} и M_{rz} определяют аналогично. При измерении моментов индуктивной и остаточной намагниченности образец устанавливают во второе положение (рис. 24, б) так, чтобы ось образца была направлена вертикально, в результате чего на систему будут действовать поля, создаваемые вертикальными составляющими индуктивной и остаточной намагниченностей. Для их разделения измерения производят при двух взаимно обратных ориентировках образца.

Так как индуктивная составляющая имеет всегда строго отвесное направление, а остаточная намагниченность меняет свое направление вместе с поворотом образца, то можно записать, что в одном положении суммарный магнитный момент $M_1 = M_i + M_r$, а в другом $M_2 = M_i - M_r$. Из этих уравнений можно найти

$$M_i = (M_1 + M_2)/2, \quad M_r = (M_1 - M_2)/2.$$

Как и при измерениях на уровне нижнего магнита, о величине действующего магнитного момента образца судят по углу закручивания нити под действием сил F_{x1} и F_{x2} с помощью отсчетного устройства.

При измерениях составляющих намагниченности по оси x берут отсчет n_1 по прибору при отвесном положении оси образца. Затем образец разворачивают на 180° вокруг горизонтальной оси и берут отсчет n_2 . По результатам измерений определяют составляющие моменты

$$M_{ix} = (n_1 + n_2/2) E_m, \quad M_{rx} = (n_1 - n_2/2) E_m.$$

Аналогично измеряют составляющие M_{iy} , M_{iz} , M_{ry} , M_{rz} . Зная составляющие магнитных моментов образца и его объем, рассчитываем величину и направление вектора остаточной намагниченности:

$$J_{rx} = M_{rx}/V, \quad J_{ry} = M_{ry}/V,$$

$$J_{rz} = M_{rz}/V.$$

Модуль полного вектора

$$J_r = \sqrt{J_{rx}^2 + J_{ry}^2 + J_{rz}^2}$$

Составляющие индуктивной намагниченности определяются аналогичными формулами:

$$J_{ix} = \frac{M_{ix}}{V}, \quad J_{iy} = \frac{M_{iy}}{V}, \quad J_{iz} = \frac{M_{iz}}{V}.$$

Для определения истинной магнитной восприимчивости образца вначале определяют составляющие кажущейся магнитной восприимчивости по осям x , y , z

$$\kappa_{kx} = \frac{J_{ix}}{Z_0}, \quad \kappa_{ky} = \frac{J_{iy}}{Z_0}, \quad \kappa_{kz} = \frac{J_{iz}}{Z_0},$$

где Z_0 — вертикальная составляющая магнитного поля Земли в районе проведения измерений.

Истинную магнитную восприимчивость образца находят по формуле

$$\kappa = \frac{3}{\frac{1}{\kappa_{kx}} + \frac{1}{\kappa_{ky}} + \frac{1}{\kappa_{kz}} - 4\pi}.$$

Астатический магнитометр МА-21 состоит из собственно магнитометра, треноги, стола с приспособлениями для установки образцов и градуировочной катушки. Пределы измерения магнитной восприимчивости прибором МА-21 $1 \cdot 10^{-6} \div 3$ ед. СГС, остаточной намагниченности $0,3 \cdot 10^{-6} \div 1$ ед. СГС.

Для измерения магнитной восприимчивости образцов применяют также измеритель ИМВ-2. Чувствительным элементом прибора является H -образный пермаллоевый сердечник, на который намотаны две пары обмоток возбуждения, питаемые от генератора переменного напряжения. Магнитные потоки каждой пары катушек направлены навстречу друг другу, так что суммарная э. д. с. в центре сердечника равна нулю. В результате в приемной катушке электрический ток регистрироваться не будет. Если к одной паре полюсов моста приложить образец, то равенство магнитных потоков в катушках нарушится, вследствие чего в измерительной обмотке появится э. д. с., прямо пропорциональная магнитной восприимчивости образца. Пределы измерения магнитной восприимчивости прибором — $(2-10^6) \cdot 10^{-6}$ ед. СГС, масса прибора — 2,5 кг.

§ 22. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

Начальным этапом интерпретации магниторазведочных данных является качественное истолкование характера магнитного поля. Сравнивая графики Z_a с геологическими разрезами, а планы

изодинам — с геологическими картами, устанавливают связь характера магнитного поля и отдельных аномалий с геологическими образованиями. При этом тщательно изучают форму, размеры, простирание и интенсивность аномалий, так как эти характеристики отражают форму и положение в пространстве геологических тел. По форме магнитные аномалии Z_a подразделяются на изометричные и вытянутые.

Изометричные аномалии, имеющие в плане примерно одинаковые размеры в любом направлении, могут быть без минимума Z_a , т. е. без окаймляющих их зоны отрицательных значений поля, и с минимумами Z_a . Изометричные аномалии без минимума Z_a соответствуют столбообразным (штокообразным) залежам, нижний конец которых находится на большой глубине, так что его влияние на форму аномалии не сказывается. Аномалии с минимумом Z_a отвечают телам небольшого распространения на глубину.

В группу вытянутых аномалий включены аномалии Z_a , длина которых в 4 раза и более превышает их ширину. Таким аномалиям соответствуют геологические тела, поперечные размеры которых малы по сравнению с их длиной (мощные и тонкие пласты различного простирания на глубину, линзы, жилы). Магнитное поле любого такого тела не зависит от координаты, определяющей длину тела, а зависит от размеров и формы фигуры сечения этого тела, поэтому они получили название двумерных. Вытянутые аномалии также могут быть с минимумом и без минимума Z_a . Аномалии без минимума соответствуют телам, глубина до нижней кромки которых в 5—6 раз превышает глубину до верхней кромки. Аномалии с минимумом соответствуют ограниченными на глубину залежам.

Графики Z_a от двумерных тел могут быть симметричными и несимметричными. При симметричном виде кривых Z_a относительно оси координат тело имеет вертикальное падение, при наличии асимметрии оно наклонено к горизонту. Причем для достаточно мощных тел более крутая ветвь кривой соответствует падению тела.

По характеру аномалий можно судить об относительной глубине возмущающих масс. Так, неглубоко залегающие тела имеют более четкие аномалии с большими градиентами по горизонтали и вертикали. Глубоко залегающие объекты создают на поверхности Земли широкие плавные аномалии с малыми градиентами, причем ширина аномалии с увеличением глубины залегания увеличивается пропорционально глубине до центра тела.

Количественная интерпретация материалов магнитной съемки проводится с целью уточнения параметров геологических тел — глубины залегания, мощности, углов падения.

Рассмотрим простейшие способы решения обратной задачи.

Интерпретация аномалий по аналитическим формулам. Используются аналитические формулы

для нахождения параметров тел простых форм при вертикальном намагничении. Кривые Z_a и H_a над шаром (рис. 25, а) рассчитываются по формулам

$$Z_a = M \frac{2h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^{3/2}}, \quad H_a = -M \frac{3hx}{(h^2 + x^2)^{3/2}},$$

где M — избыточный магнитный момент шара; h — глубина до его центра; x — текущая координата.

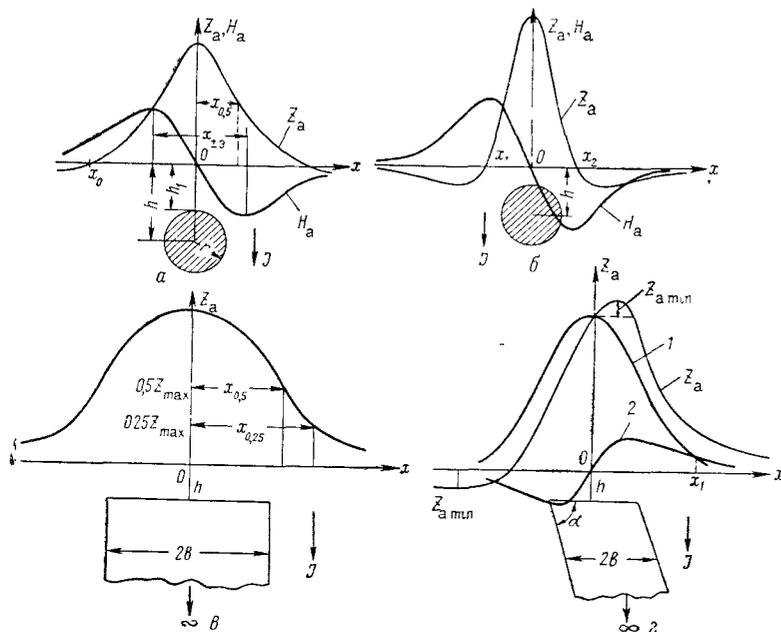


Рис. 25. Кривые Z_a и H_a над шаром (а), горизонтальным круговым цилиндром (б), мощным вертикальным пластом (в), мощным наклонным пластом (г)

Кривая Z_a симметрична относительно оси координат, имеет минимум в краевых частях, кривая H_a в левой части положительна, в правой — отрицательна, а над телом обращается в нуль. При $x = 0$ значение Z_a достигает максимального значения, $Z_{a \max} = 2M/h^3$. Из последнего выражения видно, что аномалия Z_a от сферы затухает обратно пропорционально кубу расстояния до ее центра.

Глубину до центра сферического тела по кривой Z_a находят по формуле $h = 2x_{0,5}$, а по кривой H_a — $h = x_{\pm 0}$, где $x_{0,5}$ — абсцисса полумаксимумы кривой Z_a ; $x_{\pm 0}$ — расстояние от максимума до минимума кривой H_a (рис. 25, а).

Зная h , можно найти избыточный магнитный момент сферы: $M = 1/2 h^3 Z_{a \max}$. Если на основании изучения физических свойств известна намагниченность объекта, то зная J , можно найти объем

шара $V = M/J$, после чего определится радиус сферы $r = \sqrt[3]{3V/4\pi}$ и глубина до верхней кромки $h_1 = h - r$.

Кривые Z_a и H_a (рис. 25, б) над горизонтальным круговым цилиндром бесконечного простираения рассчитываются по формулам

$$Z_a = 2M \frac{h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^2}, \quad H_a = -2M \frac{2hx}{(h^2 + x^2)^2}.$$

Форма кривых Z_a и H_a над горизонтальным круговым цилиндром аналогична форме кривых от сферы. Однако Z_a от цилиндра имеет более глубокий минимум.

При решении обратной задачи находят глубину залегания оси цилиндра по кривой Z_a как половину расстояния между точками перехода кривой через нуль, по кривой H_a — по формуле $h = 0,5 \cdot x_{\pm 0} \sqrt{3}$. Зная h , можно найти магнитный момент единицы длины цилиндра $M = 0,5 Z_{a \max} h^2$.

На рис. 26 показан план изодинам Z_a и характер кривых по интерпретационным профилям одного из месторождений магнетита. Характер северной аномалии с минимумами Z_a позволяет интерпретировать ее как аномалию от горизонтального кругового цилиндра, а характер южной аномалии может быть обусловлен сферическим телом.

Рассмотрим, как находят параметры залегания пластообразных тел, которые в природе встречаются довольно часто. Пластовые тела в зависимости от отношения горизонтальной мощности $2b$ к глубине залегания h делятся на мощные и маломощные. Если мощность пласта больше глубины до верхней кромки ($2b > h$), то пласт считается мощным, если мощность $2b$ меньше глубины залегания верхней кромки ($2b < h$), пласт считается маломощным. При бесконечном распространении на глубину кривые Z_a над пластами всюду положительны, достигают максимума над серединой пластов (рис. 25, в). Кривая Z_a от мощного пласта имеет более пологую форму в эпицентре и большие градиенты на флангах аномалии, чем Z_a от маломощного пласта.

Глубина залегания верхней кромки, маломощного пласта определяется по формуле $h = x_i (Z_{ai}/H_{ai})$, где x_i — произвольная точка на оси x , а Z_{ai} и H_{ai} — соответствующие ей значения на кривых Z_a и H_a .

Для мощного пласта по кривой Z_a можно найти не только глубину залегания верхней кромки, но и мощность тела $2b$ и интенсивность намагничения:

$$h = \frac{x_2^2 - x_1^2}{2x_1}, \quad b = \sqrt{x_1^2 - h^2},$$

$$J = \frac{Z_{a \max}}{4 \arctg(b/h)},$$

где x_1 — абсцисса точки, в которой $Z_a = 0,5 Z_{a \max}$; x_2 — абсцисса точки, в которой $Z_a = 0,25 Z_{a \max}$.

В случае наклонных пластов большого распространения на глубину кривые Z_a и H_a имеют более сложный вид (рис. 25, з). Аномалия Z_a имеет односторонний минимум и одну более пологую ветвь.

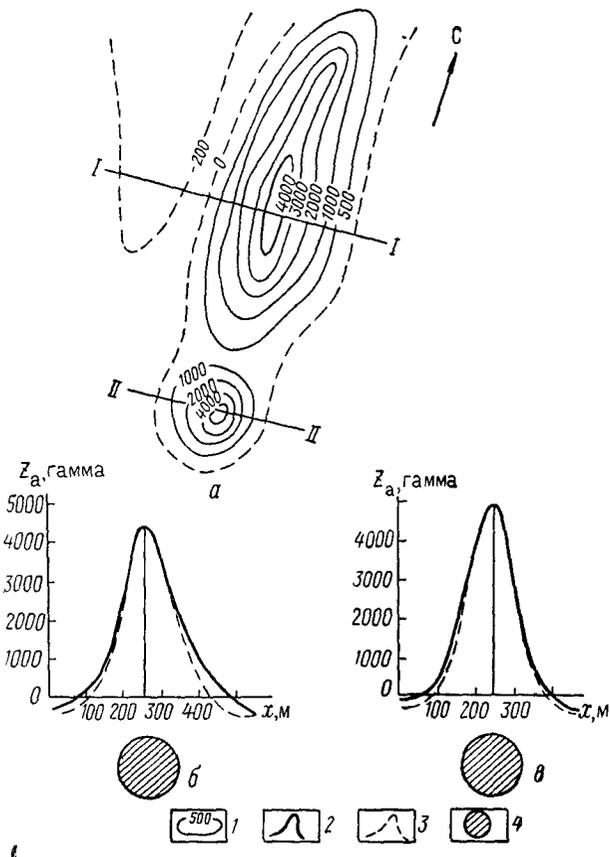


Рис. 26. Результаты интерпретации магнитных аномалий над железорудным месторождением.

a — план изодинам Z_a ; b — график Z_a по линии I—I; $в$ — график Z_a по линии II—II; 1 — изодинамы Z_a в гаммах; 2 — наблюдаемая кривая; 3 — теоретическая кривая от идеализированных рудных тел; 4 — рудные тела по результатам интерпретации

При решении обратной задачи для мощного наклонного пласта используют прием, заключающийся в разложении наблюдаемой кривой Z_a на четную составляющую (кривая 1 на рис. 25, з) и нечетную (кривая 2 на рис. 25, з). Разложение кривой производят в следующем порядке. Отыскивают начало отсчета системы координат — точку 0, которая находится над серединой верхней кромки пласта. Местоположение точки 0 определяется алгебраической суммой ординат максимума и минимума кривой Z_a . Далее,

если ось x от начала координат разбить на одинаковые отрезки влево и вправо, то значения четной кривой находят как полусумму значений Z_a в точках, равноотстоящих от начала координат, а значения нечетной кривой — как полуразность тех же значений.

При разложении кривой Z_a на четную и нечетную, как правило, вычисляются значения одной ветви, а другая ветвь достраивается симметрично первой. Параметры тела h , $2b$, J определяют по четной кривой по формулам для мощного вертикального

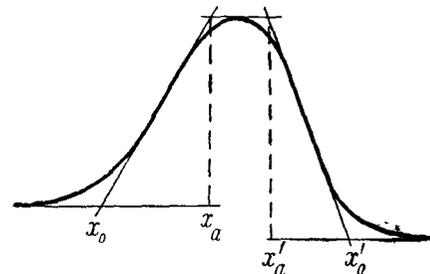


Рис. 27. Определение глубин залегания тел способом касательных

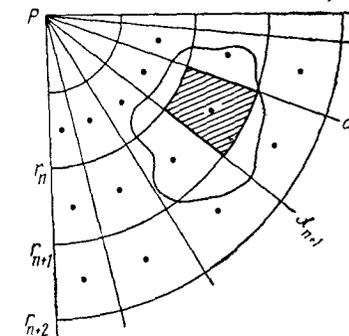


Рис. 28. Принцип построения двухмерной палетки Д. С. Микова

пласта, а нечетная кривая привлекается для определения угла наклона пласта α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x_1}{h},$$

где x_1 — абсцисса пересечения кривых.

Практически при интерпретации магнитных аномалий по аналитическим формулам поступают следующим образом.

Графики наблюдаемого поля строят по линиям, пересекающим аномалию в ее эпицентральной части. Для вытянутых аномалий наблюдаемые кривые строят вкрест простирания изолиний. Далее, задаваясь формой возмущающих объектов в соответствии с геологическими данными, снимают с расчетных кривых необходимые величины и, подставляя их в соответствующие аналитические формулы, вычисляют искомые параметры тел.

Способ касательных. Этот способ позволяет оценить глубину залегания источника аномалий. К кривой Z_a проводят пять касательных: две — в точках перегиба, две — через минимумы кривой и одну — через максимум кривой (рис. 27). С кривой снимают абсциссы точек пересечения касательных x_0 , x_a , x'_0 , x'_a . Глубину находят по формуле

$$h = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (x_2 - x_0) + \frac{1}{2} (x'_a - x'_0) \right].$$

Таблица 10

b/h	x_0/h	x_a/h	$x_0 - x_a/h$	$Z_a \text{ max}/J$	$x_0 - x_a/x_a$
0,1	1,74	0,16	1,58	0,41	9,86
0,5	1,95	0,25	1,70	1,86	6,80
1,0	2,36	0,42	1,94	3,14	4,62
2,0	3,40	1,10	2,30	4,40	2,10
3,0	4,44	1,90	2,54	4,95	1,34
4,0	5,40	2,70	2,70	5,32	1,00
5,0	6,50	3,73	2,77	5,48	0,74
8,0	9,50	6,60	2,90	5,76	0,44
10,0	11,50	8,56	2,94	5,92	0,34

В. К. Пятницким рассчитаны поправочные коэффициенты к вычисляемым глубинам, учитывающие форму тела. Для пластообразных тел коэффициенты приведены в табл. 10.

С помощью таблицы можно оценить мощность тела $2b$ и намагниченность J .

Способ подбора. Подбор тел сложной формы по кривой Z_a или H_a осуществляется с помощью двухмерной палетки Д. С. Микова или трехмерных палеток К. Ф. Тяпкина.

Палетка строится следующим образом. Пусть мы имеем двухмерное тело, сечение которого показано на рис. 28. Проведем из некоторой точки P ряд concentрических окружностей с радиусами r_n, r_{n+1} и т. д. и ряд прямых лучей под углами α_n, α_{n+1} .

Тогда для сегмента, ограниченного радиусами r_n и r_{n+1} и углами α_n и α_{n+1} , уравнения для Z_a и H_a примут вид:

$$Z_a = J (\sin 2\alpha_{n+1} - \sin 2\alpha_n) \ln \frac{r_{n+1}}{r_n},$$

$$H_a = J (\cos 2\alpha_{n+1} - \cos 2\alpha_n) \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}.$$

Приняв условно действие каждого сегмента равным 1 гамме (10^{-5} ед. СГС), $J = 100 \cdot 10^{-5}$ ед. СГС, $\sin 2\alpha_{n+1} - \sin 2\alpha = 0,125$, найдем, что $\ln r_{n+1}/r_n = 0,08$ и $r_{n+1}/r_n = 1,08$.

По этим соотношениям можно легко вычислить α и r для разбивки палетки на площадки равного действия. Каждая такая площадка в точке P будет создавать поле в 1 гамму при $J = 100 \cdot 10^{-5}$ ед. СГС.

Для удобства работы с палеткой площадки равного действия заменены точками, по которым удобно вести расчет поля, создаваемого телом. Переходный коэффициент K равен отношению намагниченности тела J_1 к намагниченности палетки:

$$K = J_1/J = J_1/100 \cdot 10^{-5}.$$

Практически для определения величины Z_a поля в точке профиля совмещают эту точку с центром палетки, направляя ось J_z

отвесно вниз (при вертикальном намагничении). Затем подсчитывают число точек S , попавших в контур тела. Умножив S на переходный коэффициент K , получают искомое значение Z_a -составляющей в точке по формуле $Z_a = SK$.

§ 23. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДОМ МАГНИТОРАЗВЕДКИ

Магниторазведка применяется для расчленения изверженных и метаморфических горных пород по составу, для определения местоположения и элементов залегания, их контактов с осадочными горными породами; поисков месторождений железа, цветных металлов, бокситов и других полезных ископаемых. На рис. 29 дан пример расчленения сложной интрузии по составу. Граниты и граносиениты выделяются пониженным магнитным полем. Оно достигает минимальных значений там, где мощность кислых и щелочных интрузивных пород максимальна. Интрузивные породы основного состава картируются повышенными значениями магнитного поля. Амплитуда их больше там, где мощность диоритов и габбро максимальна. Включение в комплекс работ гравиразведки позволяет расчленить интрузию по составу на глубине.

В процессе геологического картирования магниторазведку применяют для выявления и прослеживания тектонических нарушений, представленных гидротермально измененными немагнитными породами, или дайками высокомагнитных пород.

Основные запасы железа сосредоточены в залежах гематитомagnetитов среди железистых кварцитов, магнетитогематитов на контактах изверженных пород и известняков, а также гематит-сидерит-шамозитовых руд в осадочных породах. Магниторазведка применяется для поисков месторождений первых двух типов. Примером крупнейшего месторождения первого типа являются железистые кварциты, обусловившие Курскую

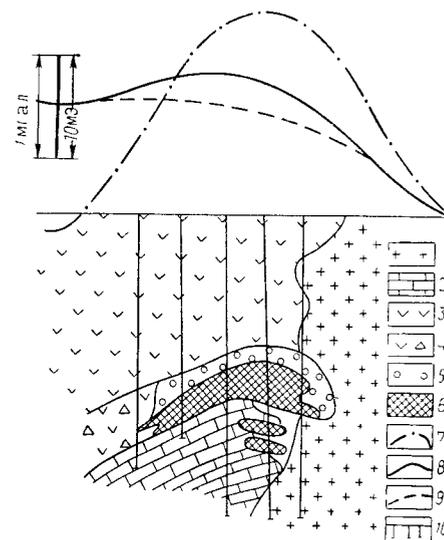


Рис. 29. Графики магнитного поля и силы тяжести над месторождением магнетита.

1 — гранит; 2 — известняк; 3 — порфирит; 4 — туф порфирита; 5 — скарн; 6 — магнетит; 7 — график ΔZ ; 8 — график Δg ; 9 — линия регионального фона поля силы тяжести; 10 — кварциты

ГРАВИТАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА

магнитную аномалию. Она имеет амплитуду около 1 Э и более и простирается на сотни километров в длину.

Геофизические поля магнетитового месторождения показаны на рис. 29. Амплитуда магнитной аномалии достигает в эпицентре 20—30 мЭ. Залежь отмечается локальной гравиметровой аномалией.

Магниторазведка применяется для поисков других полезных ископаемых, содержащих в некоторых количествах ферромагнитные минералы. Повышенным магнитным полем выделяется никеленосная кора выветривания серпентинитов, содержащих магнетит.

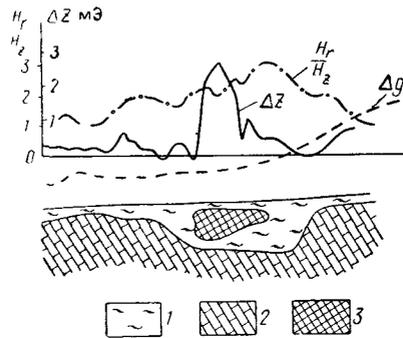


Рис. 30. Графики магнитного поля, силы тяжести и метода ДИП над месторождением бокситов.
1 — глины каолиновые, 2 — карбонатные породы, 3 — бокситы

В некоторых случаях с помощью магниторазведки выделяются каменистые бокситы, содержащие магнетит и гематит. На рис. 30 показана залежь бокситов, приуроченная к заполненной глинами депрессии среди карбонатных пород. Аномалия над залежью имеет амплитуду чуть более 200 гамм. Поскольку вмещающие залежь породы немагнитны, она четко выделяется. Депрессия картируется понижением поля силы тяжести и кажущегося сопротивления.

Еще меньшую амплитуду (десятки гамм) имеют аномалии над алмазонасными кимберлитовыми трубками. Для более уверенного обнаружения трубок одновременно с магнитной съемкой применяют аэрофотографирование. На снимках кимберлитовые трубки имеют округлые очертания.

Гравитационная разведка (сокращенно гравиразведка) — один из ведущих методов разведочной геофизики, нашедший широкое применение при изучении геологического строения различных участков земной коры, выявлении нефте- и газоносных структур, угольных депрессий, поисках рудных месторождений.

Гравитационная разведка является составной частью науки гравиметрии (от латинского слова *gravitas* — тяжесть), основанной на изучении поля силы тяжести на поверхности Земли и в околоземном пространстве. Изучение поля силы тяжести Земли как планеты используется при исследовании ее фигуры, вычислении орбит искусственных спутников Земли и космических кораблей, астрономических исследованиях.

При решении же геологических задач прикладной гравиметрии изучается поле силы тяжести, связанное с распределением масс горных пород, слагающих верхние части земной коры.

§ 24. СИЛА ТЯЖЕСТИ. ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Силой тяжести называется сила, с которой всякое тело притягивается к Земле. В каждой точке земной поверхности сила тяжести — это равнодействующая сил притяжения Земли, Солнца, Луны и других планет и центробежной силы, возникающей вследствие суточного вращения Земли вокруг ее оси. Силы притяжения масс Луны и Солнца, действующие на точку, расположенную на поверхности Земли, ничтожно малы и учитываются лишь при высокоточных измерениях. Таким образом, можно говорить, что сила тяжести G есть равнодействующая двух сил: силы притяжения Земли F и центробежной силы P (рис. 31).

Сила притяжения Земли подчиняется закону всемирного тяготения Исаака Ньютона. Согласно этому закону, два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между центрами этих масс. Следовательно, сила притяжения Земли с массой M , действующая на материальную точку с массой m , расположенную на ее поверхности, выражается формулой

$$F = f \frac{Mm}{r^2},$$

где r — расстояние между центрами масс (в нашем случае r — радиус Земли); f — гравитационная постоянная.

Единицей измерения силы притяжения в системе СГС является дина, в системе СИ — 10^{-5} Н. Сила притяжения представляет собой вектор, направленный по прямой, соединяющей центры тел, в сторону большей массы. Физический смысл гравитационной постоянной определяется силой притяжения двух материальных точек с массой в 1 г каждая, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга.

Размерность

$$[f] = [L]^3/[T]^2 \cdot [M],$$

где L — длина; T — время; M — масса.

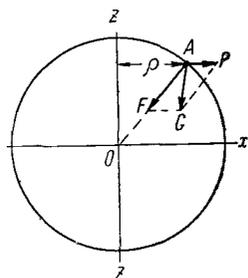


Рис. 31. Вектор силы тяжести и его составляющие

Численно гравитационная постоянная в системе СГС равна $6,67 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}$, в системе СИ — $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$.

Центробежная сила P , действующая на материальную точку с массой m и участвующая во вращении Земли, располагается в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, а ее величина определяется формулой

$$P = m\omega^2\rho,$$

где ω — угловая скорость вращения точки; ρ — расстояние от точки до оси вращения.

Таким образом, сила тяжести Земли

$$G = f \frac{Mm}{r^2} + m\omega^2\rho$$

Мерой силы тяжести служит сила, действующая на единицу массы ($m = 1$), называемая напряженностью поля или ускорением силы тяжести,

$$g = G/m = f(M/r^2) + \omega^2\rho.$$

На практике вместо терминов напряженность поля силы тяжести или ускорение силы тяжести обычно используют упрощенное выражение силы тяжести, подразумевая под этим напряженность гравитационного поля.

За единицу ускорения силы тяжести в системе СГС принято ускорение, которое развивает масса в 1 г под действием силы в 1 дина. Эта единица в честь ученого Галилея получила название гал:

$$[\text{гал}] = \frac{[\text{дина}]}{[\text{г}]}.$$

В практике обычно используют более мелкие единицы: миллигал (1 мгал = 10^{-3} гал) и микрогал (1 мкгал = 10^{-6} гал). В системе СИ за единицу ускорения силы тяжести принимается такое

ускорение, которое развивает масса в 1 кг под действием силы в 1 Н:

$$[g] = \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = \frac{[\text{кг}] \cdot [\text{м}]}{[\text{с}]^2 [\text{кг}]} = \frac{[\text{м}]}{[\text{с}]^2}.$$

Напряженность гравитационного поля Земли изменяется от 978 гал на экваторе до 983 гал на полюсах, т. е. сила тяжести возрастает от экватора к полюсу на 0,5 гал на 1 км. Из двух сил, слагающих силу тяжести, сила притяжения значительно превышает центробежную силу: отношение максимального значения центробежной силы (на экваторе) к минимальному значению силы тяжести составляет 1/288. Центробежная сила имеет максимальное значение на экваторе (3,4 гал), где частицы земной поверхности движутся с наибольшей скоростью, на полюсах Земли она отсутствует, так как скорость вращения частиц земной поверхности равна нулю.

§ 25. ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЕГО ПРОИЗВОДНЫЕ

Гравитационное поле, связанное с действием сил притяжения масс и центробежных сил, обладает свойствами потенциального поля. Поскольку центробежное ускорение мало по сравнению с ускорением силы притяжения, можно считать, что $g \approx f(M/r^2)$. Потенциал силы тяжести для точки, расположенной на поверхности Земли, имеет вид $W_1 = fM/r$. В любой другой точке, находящейся на продолжении земного радиуса на расстоянии $r + \Delta r$, потенциал $W_2 = fM/(r + \Delta r)$. Приращение потенциала

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{fM}{r + \Delta r} - \frac{fM}{r} = -\frac{fM}{r} \left(\frac{\Delta r}{r + \Delta r} \right).$$

При малом значении Δr можно записать

$$\Delta W = f \frac{M}{r^2} \Delta r = -g \Delta r,$$

отсюда

$$g = -dW/dr,$$

т. е. сила тяжести — есть первая производная гравитационного потенциала, характеризующая скорость изменения потенциала по какому-либо направлению.

Поскольку физический смысл приращения потенциала dW есть работа, производимая при движении притягиваемой точки на отрезке Δr , то $dW = g \Delta r$. Так как направления Δr и силы g могут не совпадать, то для получения работы на отрезке Δr надо произведение $g \Delta r$ умножить на косинус угла между ними:

$$dW = g \Delta r \cos(g, \Delta r).$$

Большой интерес представляют случаи, когда точка движется в направлении действующей силы и перпендикулярно к ней. При перемещении точки перпендикулярно к действующей силе,

$\cos(g, \Delta r) = 0, dW = 0$. Но если приращение работы всюду равно нулю, то сама работа есть величина постоянная:

$$W = \text{const.} \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой уравнение некоторой поверхности, обладающей тем свойством, что в любой ее точке сила тяжести направлена по нормали к ней. Придавая функции W различные значения, можно распределение потенциала силы тяжести Земли представить семейством эквипотенциальных поверхностей. Одной из таких поверхностей будет поверхность, совпадающая с уровнем воды в спокойном океане. Поэтому поверхности равного потенциала в гравиметрии называют **уровенными поверхностями**.

Рассмотрим случай, когда точка движется в направлении действующей силы. Так как угол между g и Δr равен нулю, то

$$\cos(g, \Delta r) = 1, \quad dW = g \Delta r. \quad (8)$$

Из уравнения (8) можно найти расстояние между двумя соседними **уровенными поверхностями**

$$\Delta r = dW/g. \quad (9)$$

Таким образом, расстояние по нормали между двумя **уровенными поверхностями** обратно пропорционально действующей силе. Так как величина g не является постоянной, то и расстояния между линиями равного потенциала будут неодинаковыми, причем там, где сила тяжести больше и изолинии идут гуще.

Выберем прямоугольную систему координат, начало которой (точка 0) расположено в точке касания **уровенной поверхности** и горизонтальной плоскости. Ось x направим на север, ось y — на восток, ось z — перпендикулярно к **уровенной поверхности**, вниз. При таком расположении осей первые частные производные гравитационного потенциала в точке 0 по x и y равны нулю, ($\partial W/\partial x = W_x = 0, \partial W/\partial y = W_y = 0$), а составляющая по z $\partial W/\partial z = W_z = g$.

Наряду с первой производной гравитационного потенциала, рассматривают производные более высоких порядков. В частности, вторыми производными потенциала будут градиенты силы тяжести, показывающие, с какой скоростью изменяется g по каким-либо направлениям. Выбирая направления изменения силы тяжести по координатным осям, запишем выражения для ее градиентов:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} = W_{xz}, \quad \frac{\partial g}{\partial y} = \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} = W_{yz},$$

$$\frac{\partial g}{\partial z} = \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial z} = W_{zz}.$$

Величины W_{xz} и W_{yz} показывают скорость изменения силы тяжести вдоль осей x и y , лежащих в горизонтальной плоскости

и поэтому получили название **горизонтальных градиентов**. Величина W_{zz} показывает изменение силы тяжести в вертикальном направлении и называется **вертикальным градиентом**.

Кроме горизонтальных и вертикальных градиентов силы тяжести, измеряются также вторые производные $2W_{xy} = 2 \frac{d^2 W}{dx dy}$ и $W_{\Delta} = \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$, дифференцирование которых производится только по горизонтальным координатам.

Производные $2W_{xy}$ и W_{Δ} , называемые **кривизнами**, характеризуют отклонения поверхности уровня в точке наблюдения от сферической формы. Если через ось z , являющуюся нормалью к **уровенной поверхности**, провести ряд вертикальных плоскостей, называемых **нормальными сечениями**, то среди них будут два главных нормальных сечения, которые имеют в данной точке максимальную и минимальную кривизны. Кривизна сечения характеризуется величиной, обратной радиусу Земли ($1/r$).

Вторые производные W_{Δ} и $2W_{xy}$ с кривизнами связаны следующими соотношениями:

$$g \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{W_{\Delta}}{\cos 2\varphi_0}, \quad \text{tg } 2\varphi_0 = \frac{2W_{xy}}{W_{\Delta}}$$

где g — сила тяжести; $1/r_1 - 1/r_2$ — соответственно максимальная и минимальная кривизна сечений в данной точке поверхности; φ_0 — азимут плоскости нормального сечения, кривизна которого наибольшая.

Сечение с минимальной кривизной расположено в азимуте $\varphi_0 + 90^\circ$.

Величина $1/r_1 - 1/r_2$ для сфероида равна нулю, для геоида она отличается от нуля и характеризует степень отклонения поверхности геоида от поверхности сфероида.

В качестве единицы измерения вторых производных силы тяжести принимается изменение силы тяжести, равное 1 гал на 1 см,

$$\frac{[\text{см}]}{[\text{с}^2]} : [\text{см}] = \frac{1}{[\text{с}^2]}$$

Эта единица очень крупная, поэтому на практике используется величина, равная $10^{-9} \frac{1}{\text{с}^2}$, получившая название **э т в е ш** (Е).

§ 26. НОРМАЛЬНОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Нормальным полем Земли называется теоретически рассчитанное поле в предположении, что Земля представляет собой геометрически правильное тело, состоящее из однородных по плотности концентрических слоев.

Самые первые представления человека о фигуре Земли как о шарообразном теле известны были еще до нашей эры. Когда в XVII столетии И. Ньютоном было обнаружено сжатие Земли,

то ее стали представлять в виде эллипсоида вращения. По новейшим данным, полученным с помощью искусственных спутников Земли, величина сжатия земного эллипсоида $\alpha = (a-b)/a = 1/298,24$, где a и b — большая и малая полуоси эллипсоида ($a-b = 21,38$ км).

Для вычисления нормальных значений силы тяжести Земли используются формулы, рассчитанные для эллипсоида вращения в предположении, что Земля состоит из concentрических слоев, однородных по плотности.

Впервые основные соотношения, связывающие форму Земли с распределением силы тяжести на ней, были получены в 1743 г. ученым Клеро:

$$g_0 = g_e(1 + \beta \sin^2 \varphi), \quad \beta = \frac{5}{2} q - \alpha,$$

где g_0 — нормальное значение силы тяжести; g_e — значение силы тяжести на экваторе; φ — широта пункта наблюдения; $q \approx 1/300$.

Формулы Клеро позволяют вычислить теоретическое значение силы тяжести в какой-либо точке земной поверхности, если известна широта этого пункта. Коэффициенты в формуле Клеро для нормального распределения силы тяжести выводились многими авторами, но практическое применение нашли формулы Гельмерта и международная формула Кассиниса.

Формула Гельмерта (1901—1909 гг.) имеет вид

$$g_0 = 978030(1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi).$$

Формула Кассиниса принята как международная на Стокгольмском международном конгрессе в 1930 г.:

$$g_0 = 978049(1 + 0,0052884 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi).$$

Нормальные значения для вторых производных силы тяжести также находят в предположении, что Земля является правильным геометрическим телом — эллипсоидом вращения. Если ось x направить по географическому меридиану на север, ось y — по параллели на восток, z — по нормали к поверхности эллипсоида, а начало координат совместить с точкой наблюдения, расположенной на широте φ , то формулы для нормальных значений вторых производных будут иметь вид

$$W_{xz} - \frac{g_e \beta}{r_1} \sin 2\varphi = 8,16 \sin 2\varphi, \quad (10)$$

$$W_{\Delta} = g_0 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 10,3 \cos^2 \varphi, \quad (11)$$

$$W_{yz} = 2W_{xy} = 0. \quad (12)$$

Нормальные значения первых и вторых производных гравитационного потенциала, рассчитанные в зависимости от широты местности, могут быть сведены в таблицы.

Изображение формы Земли в виде эллипсоида является весьма приближенным, так как физическая поверхность Земли отличается большой сложностью. Отклонение поверхности Земли как эллипсоида от истинной ее поверхности определяется рельефом местности и достигает нескольких километров.

По современным представлениям, форма Земли является геоидом. Изображение формы Земли в виде геоида было вызвано следующими соображениями. Поверхность Земли на 72% покрыта морями и океанами, образующими единую водную поверхность. Остальные 28% земной поверхности заняты материками, слабо возвышающимися над уровнем воды в Мировом океане. Это дало основание в качестве фигуры Земли принять уровенную поверхность, совпадающую с уровнем воды Мирового океана в спокойном состоянии и продолженную под континенты так, что она всюду перпендикулярна к направлению полного вектора напряженности гравитационного поля. Такую поверхность назвали *г е о и д о м*.

Переход от эллипсоида к геоиду приближает нас к физической поверхности Земли только для участков океанов. Для участков же суши отклонение поверхности геоида от истинной земной поверхности, как и для эллипсоида, колеблется от сотен метров до первых километров. Расхождение между поверхностями геоида и эллипсоида не превышает 100 м. Геоид — фигура геометрически неправильная и не может быть охарактеризована аналитически, как поверхность эллипсоида. Однако введение геоида имеет большое практическое значение, так как эта поверхность используется для отчета высот физической поверхности Земли как от уровня моря. Для СССР в качестве начала высот принят средний уровень Балтийского моря. Использование поверхности геоида позволяет гравиметровые съемки, выполненные на разных высотах, приводить к одному уровню и сравнивать их между собой.

§ 27. РЕДУКЦИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Как мы видели выше, нормальные значения силы тяжести рассчитываются для уровня эллипсоида. Чтобы наблюдаемые значения силы тяжести, относящиеся к реальной поверхности Земли, сравнивать с нормальными, их также необходимо приводить (редуцировать) к уровню эллипсоида. Однако на практике наблюдаемые значения редуцируют к поверхности геоида, считая, что для сравнительно небольших территорий погрешности за счет изменения превышений геоида над сфероидом невелики. Задача приведения измеренных значений силы тяжести к уровню моря заключается в вычислении поправок за высоту точки наблюдения над уровнем моря и плотность промежуточного слоя.

Поправка за высоту точки наблюдения, называемая *п о п р а в к о й в с в о б о д н о м в о з д у х е*, учитывает убывание силы тяжести с высотой. При этом предполагается, что между точкой наблюдений и уровнем моря массы отсутствуют.

Пусть точка наблюдения B имеет высоту h над уровнем моря (рис. 32, а). Обозначив значение силы тяжести на уровне моря через g_0 , а на высоте h через g_h и принимая Землю за шар с радиусом R , можно записать

$$g_0 = -f \frac{M}{R^2}, \quad g_h = -f \frac{M}{(R+h)^2},$$

$$\Delta g = g_0 - g_h = -fM \left[\frac{1}{R^2} - \frac{1}{(R+h)^2} \right] = -\frac{fM}{R^2} \left[1 - \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \right] = -g_0 \left[1 - \left(1 + \frac{h}{R} \right)^{-2} \right].$$

Разлагая выражение в квадратных скобках по формуле бинома Ньютона и сохраняя первый член ряда (остальные члены весьма малы вследствие малости отношения h/R), получим $\Delta g = -g_0 [1 - (1 + 2h/R)] = -2g_0 (h/R)$. Принимая $g_0 = 978000$ мгал, $R = 6371000$ м, получим, что сила тяжести уменьшается на 0,3086 мгал на 1 м высоты.

Поправка за промежуточный слой учитывает влияние масс, расположенных между точкой наблюдений и уровнем моря. Промежуточный слой, заключенный между уровнем моря и дневной поверхностью в предположении, что Земля ровная, можно в первом приближении считать плоско-параллельной пластиной, безграничной и однородной по составу.

На рис. 32, а промежуточный слой заключен между линией $A'B'C'$, соответствующей поверхности геоида, и линией ABC , соответствующей поверхности пластины. Гравитационное влияние плоско-параллельной пластины вычисляется по формуле $\Delta g_{\pi} = 2\pi f \sigma h$. Подставляя значение гравитационной постоянной и считая h в метрах, получим Δg_{π} в миллигалах:

$$\Delta g_{\pi} = +0,0419 \sigma h.$$

Поправка за свободный воздух вводится в наблюдаемые значения силы тяжести со знаком плюс, поскольку с удалением точки наблюдения от уровенной поверхности значение силы тя-

жести уменьшается. Поправка за промежуточный слой вводится со знаком минус, так как наличие этого слоя при наблюдениях на дневной поверхности увеличивает массу Земли, а следовательно, и величину силы тяжести.

Суммарная поправка за высоту и промежуточный слой, называемая поправкой Буге, имеет вид: $\Delta g_B = \Delta g_{св} + \Delta g_{\pi} = (0,3086 - 0,0419 \sigma) h$.

При рассмотрении поправки за промежуточный слой мы предполагали поверхность Земли ровной. Однако если в районе пункта наблюдений земная поверхность имеет значительные неровности, то вносится поправка за рельеф местности Δg_p . Эта поправка всегда положительна, так как и положительные, и отрицательные формы рельефа уменьшают измеряемое значение силы тяжести, что хорошо видно из рис. 32, б, в. Притяжение масс, расположенных выше точки наблюдения, центр тяжести которых находится в точке B , направлено по линии AB (рис. 32, б). Вертикальная проекция этой силы g_B направлена вверх и уменьшает силу тяжести в точке. Такое же действие оказывает и недостаток масс, расположенных над уровнем горизонта точки A (рис. 32, в).

Учитывая поправку за рельеф, мы уточняем поправку Буге, так как переходим от идеализированной плоско-параллельной пластины к реальной земной поверхности.

Для вычисления поправки за влияние рельефа обычно местность, окружающую точку наблюдения, разбивают на ряд кольцевых секторов системой концентрических окружностей и радиальных прямых с центром в точке наблюдения. Действие реального рельефа в пределах каждого элементарного сектора заменяется притяжением криволинейной призмы, высота которой равна средней высоте местности в пределах сектора. Просуммировав влияние всех секторов, получим поправку за влияние рельефа.

Практически поправки за окружающий рельеф рассчитывают с помощью облегчающих громоздкие расчеты номограмм или палеток П. И. Лукавченко, В. М. Березкина, Н. А. Плохих.

§ 28. АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Если бы Земля была однородна по плотности, то измеренные на поверхности и приведенные к уровню моря значения силы тяжести g (для краткости их называют приведенными значениями) совпадали бы с теоретически вычисленными значениями g_0 . Но поскольку в действительности Земля состоит из различных по плотности геологических образований, на поверхности Земли наблюдаются аномалии, определяемые как разность приведенных значений силы тяжести и нормальных, т. е. $\Delta g = g - g_0$.

В зависимости от того, какие поправки вносятся в измеренные значения, различают аномалии в свободном воздухе и аномалии Буге.

Аномалией в свободном воздухе называется аномалия, вычисленная с учетом поправки за свободный воздух,

$$\Delta g_{\text{св. в}} = g - g_0 + \Delta g_{\text{ср. в}}.$$

Аномалия, вычисленная с поправкой Буге, называется а н о м а л и е й Б у г е:

$$\Delta g_{\text{Б}} = g - g_0 + \Delta g_{\text{св. в}} - \Delta g_{\text{п}} + \Delta g_{\text{р}}. \quad (13)$$

Аномалия в свободном воздухе используется для изучения фигуры Земли. Аномалии Буге, позволяющие выделить аномальные массы в верхней части земной коры, являются предметом изучения разведочной геофизики. На территории СССР самые крупные аномалии силы тяжести достигают +200 мгал. Самая интенсивная положительная гравиметровая аномалия на поверхности Земли замерена на Гавайских островах (+669 мгал), самая интенсивная отрицательная — у Антильских островов (—338 мгал).

§ 29. ПОНЯТИЕ ОБ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Первое определение абсолютного значения силы тяжести было выполнено Галилеем в 1590 г. Способ основывался на законе, связывающем путь S , пройденный свободно падающим телом, с ускорением падения тела g и временем падения t :

$$S = gt^2/2.$$

Для того, чтобы найти силу тяжести по этой формуле, необходимо измерить путь, пройденный телом, и время движения по нему. Однако слабое развитие техники измерения малых промежутков времени и расстояний не могло тогда обеспечить точных результатов. Поэтому определение силы тяжести, осуществленное Галилеем, являлось весьма приближенным.

Большое распространение нашел метод измерения силы тяжести, основывающийся на определении периода колебаний свободно качающегося маятника. Маятником называется любое твердое тело, способное совершать свободные колебательные движения вокруг горизонтальной оси. Известно, что закон колебания маятника, открытый Гюйгенсом в конце XVII в., выражается формулой

$$T = \pi \sqrt{l/g},$$

где T — период колебания маятника, определяемый временем в секундах, за которое маятник в своих колебаниях переходит из одного крайнего положения в другое; l — длина маятника в сантиметрах; g — ускорение силы тяжести в галах.

Наблюдения периода качания маятника осуществляются по специальной довольно сложной методике.

Для того, чтобы обеспечить точность измерений силы тяжести с погрешностью не более 1 мгал, т.е. до одной миллионной доли полного значения этой силы (а в настоящее время требуется выявлять еще меньшие гравитационные аномалии), длину и период качаний маятника требуется определять с той же или даже с еще большей точностью. Для этого приходится идти по пути увеличения количества единичных отсчетов на одном пункте наблюдений. И потому наблюдения занимают до 8 ч и более. Такая низкая производительность труда не удовлетворяет геофизическую службу. К тому же и достигаемая при маятниковых наблюдениях точность не отвечает современным требованиям.

Однако маятниковые наблюдения позволяют проводить абсолютные измерения силы тяжести. С их помощью такие определения проведены в опорных пунктах, к которым привязывают все гравиметрические измерения на Земле (Потсдам, Пулково и др.).

§ 30. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

1. Принцип измерений

Для относительных измерений силы тяжести применяют гравиметры. Простейший гравиметр построен по принципу пружинных весов (рис. 33, а), в которых сила, с какой гравитационное поле действует на массу грузика, компенсируется силой упругой пружины. При этом грузик совершает поступательное движение. Условие равновесия силы тяжести и упругих сил выражается соотношением

$$mg = \tau l,$$

где l — длина; τ — коэффициент упругости пружины.

Абсолютное значение величины l определить нельзя, поэтому производят относительные измерения, позволяющие определить изменение величины l при измерениях на двух точках:

$$mg_1 - mg_2 = \tau (l_1 - l_2), \quad \Delta g = \frac{\tau}{m} \Delta l.$$

Последнее уравнение показывает, что мерой изменения силы тяжести служит изменение длины пружины. Гравиметры, в которых груз совершает поступательные перемещения, пропорциональные силе тяжести, называются гравиметрами I рода. Такие гравиметры имеют линейную шкалу.

Изменения длины пружины под действием силы тяжести весьма малы, поэтому необходима высокая точность измерений. Для определения приращения силы тяжести с погрешностью 0,1—0,2 мгал необходимо приращение длины определять с погрешностью долей микрона. Поэтому очень важной задачей при конструировании гравиметров является повышение их чувствительности. Эта задача решается как путем применения точных способов регистрации

малых перемещений (оптический, фотоэлектрический), так и путем применения специальных конструкций чувствительных систем.

Подавляющее большинство современных гравиметров относится к классу гравиметров вращательного типа (или гравиметров II рода), в которых груз совершает не поступательное, а вращательное движение около некоторой точки подвеса.

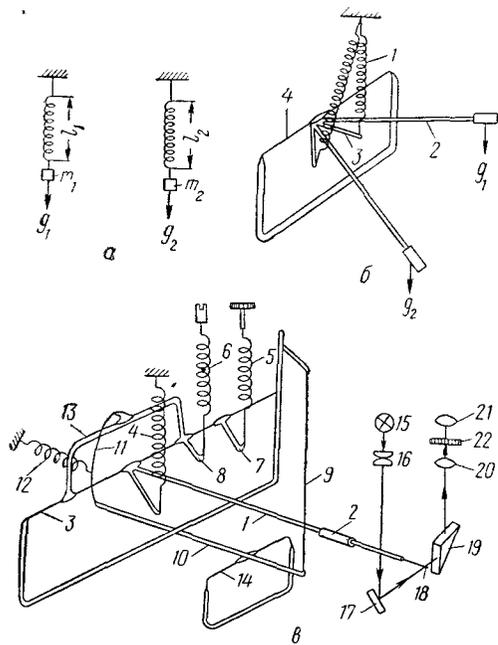


Рис. 33. Принцип действия гравиметров, а — схема пружинного гравиметра, б — схема астазирующего устройства; в — принципиальная схема кварцевого астазированного гравиметра

Чувствительный элемент такой системы — маятник с грузом на конце — приварен к горизонтальной кварцевой или металлической нити, закрученной на определенный угол. Под действием силы тяжести маятник отклонится от первоначального положения на угол α , закрутив на этот же угол нить подвеса, уравновешивающую силу тяжести. Чувствительность гравиметра определяется величиной угла поворота маятника при изменении силы тяжести на 1 мгал.

Угловая чувствительность гравиметров II рода меняется в зависимости от угла маятника, в связи с чем для сохранения линейности шкалы применяется нулевой (компенсационный) способ, при котором маятник приводится в одно и то же горизонтальное положение. Широкое распространение гравиметров вращательного типа объясняется тем, что в них проще повысить чувствительность системы путем применения специальных астазирующих устройств. Принцип астазирования заключается в том, что система приводится в состояние неустойчивого равновесия, при котором грузик получает дополнительное смещение, так что незначительным изменениям силы тяжести соответствуют значительные изменения положения маятника. Поясним принцип астазирования на примере. На рис. 33, б астазирующим устройством служит пружина 1, которая своим верхним концом жестко соединена с корпусом прибора, а нижним — с маятником 2 посредством короткого рычага 3. В положении равновесия момент действия силы тяжести g_1 уравновешивается противодействующим моментом упругих сил нити подвеса 4 и пружины 1.

Под действием большей силы тяжести g_2 рычаг отклонится на больший угол. Но при этом момент упругой силы главной пружины уменьшится, так как уменьшится плечо пружины, в результате чего маятник получит дополнительное перемещение вниз. При отклонении рычага вверх от исходного положения (под действием меньшей силы тяжести) плечо действия главной пружины возрастет и рычаг получит дополнительное перемещение вверх.

Гравиметры для относительных наземных съемок нашли очень широкое распространение, что объясняется их высокой производительностью и точностью. Погрешность определения силы тяжести гравиметром составляет 0,1—0,2 мгал и выше, время наблюдения на одной точке 3—5 мин. Техника наблюдений с гравиметром весьма проста. Ввиду малого веса гравиметры могут использоваться в различных условиях. Наряду с положительными качествами, гравиметры имеют ряд существенных недостатков, одним из которых является изменение показаний прибора вследствие нестабильности чувствительной системы. В отличие от маятниковых приборов, с помощью которых может быть измерена любая величина силы тяжести, диапазон гравиметров ограничен.

В настоящее время разработано несколько десятков систем отечественных и зарубежных гравиметров, различающихся по принципу действия чувствительных систем, по способу отсчета, конструктивными особенностями. В СССР для наземных гравиметровых съемок наибольшее применение нашли кварцевые астазированные и металлические астазированные гравиметры вращательного типа.

2. Кварцевые астазированные гравиметры

В нашей стране нашли широкое применение различные типы кварцевых гравиметров (ГКМ, ГАК-3М, ГАК-4М, ГАК-7М, ГАК-7Т, ГРК-1, ГРК-2 и др.). Основной частью гравиметров является упругая система, все детали которой, за исключением платинового грузика маятника и металлической нити температурного компенсатора, изготовлены из плавленного кварца. Кварц обладает высокой прочностью и легко поддается обработке, так что из него можно изготовить пружины и нити очень малых диаметров. Однако кварцевое стекло обладает тем недостатком, что его упругие свойства изменяются под воздействием внешней температуры, что ведет к необходимости применения в системах дополнительных устройств, снижающих температурное влияние на показания приборов.

Обобщенная схема кварцевого астазированного гравиметра изображена на рис. 33, в. Чувствительный элемент гравиметра состоит из маятника 1 с грузиком 2 на конце. Маятник удерживается в равновесии упругими силами нити закручивания 3 и главной астазирующей пружины 4. Поскольку у гравиметров вращательного типа применяется компенсационный способ

отсчета, то на каждой точке измерений маятник выводится в горизонтальное положение с помощью дополнительных пружин 5 и 6, меняющих закручивание нити подвеса рычага. Пружина 5, называемая измерительной, связана с отсчетным микрометром, имеет небольшую жесткость и служит для измерения величины силы тяжести в небольшом диапазоне (70—150 мгал). Другая пружина 6, называемая диапазонной, имеет большую жесткость и служит для расширения диапазона измерения силы тяжести до нескольких тысяч миллигал. Изменение диапазона достигается путем закручивания или, наоборот, раскручивания диапазонной пружины, что ведет за собой перемещение маятника. Пружины соединены с нитью 3 при помощи рычагов 7 и 8.

Уравнение равновесия упругой системы имеет вид:

$$M_g = M_\tau + M_f,$$

где M_g — момент силы тяжести; M_τ — момент кручения нити; M_f — момент главной астазирующей пружины.

В развернутом виде уравнение принимает вид

$$mgl \cos(\alpha + \beta) = \tau(\alpha_0 + \alpha) + fr(y \cos \alpha - x \sin \alpha),$$

где m — масса рычага; l — длина рычага; α_0 — начальный угол закручивания нити подвеска маятника; α — угол отклонения маятника от горизонтального положения (и дополнительный угол закручивания нити); τ — коэффициент кручения нити; β — угол отклонения корпуса прибора от горизонтального положения; f — линейная жесткость главной пружины; r — расстояние от оси вращения до нижней точки крепления главной пружины; x , y — координаты точки крепления верхнего конца пружины.

На показания гравиметра в большой степени влияет температура внешней среды, так как под действием температуры изменяются константы материала, из которого изготовлены детали прибора. Закон изменения упругих свойств пружин и нитей подвеса довольно сложный и в общем случае может быть выражен формулой

$$\Delta g_t = K_1 t + K_2 t^2,$$

где K_1 и K_2 — соответственно линейный и квадратичный коэффициенты температурного компенсатора.

Учитывая свойства плавленого кварца, коэффициенты $K_1 = 120$ мгал/градус, $K_2 = 0,15$ мгал/градус. Таким образом, изменение температуры на один градус вызывает кажущееся изменение силы тяжести на 120 мгал. Некоторые гравиметры снабжены только линейными компенсаторами температурных влияний, более совершенные конструкции имеют еще и компенсаторы криволинейности.

Линейный компенсатор состоит из медной нити 9 (рис. 33, е), верхним концом припаянный к корпусу прибора, а нижним к ры-

чагу 10, вращающемуся на нити 14. Принцип действия компенсатора состоит в следующем.

При увеличении температуры детали из металла имеют способность расширяться, упругость же кварца при этом увеличивается. Следовательно, при увеличении температуры маятник 1 поднимается вверх вследствие сжатия пружины 4, нить 3 закрутится против часовой стрелки. С другой стороны, нить 9 с повышением температуры удлинится, при этом конец рычага 10, а вместе с ним рамка температурного компенсатора поднимется вверх, закручивая нить 3 по часовой стрелке. Таким образом, вращающие моменты маятника прибора и линейного компенсатора направлены противоположно, а их константы подобраны так, чтобы эти моменты были равны. Применение линейных компенсаторов позволяет уменьшить температурные влияния примерно в 80 раз.

Компенсатор криволинейности состоит из изогнутой нити 11 и пружины 12. Принцип действия компенсатора заключается в том, что при линейном изменении длины нити 9 рамка 13 под действием нити 11 будет поворачиваться по нелинейному закону. Величину нелинейности можно регулировать, изменяя прогиб нити путем натяжения пружины 12. Применение компенсаторов нелинейной части температурной характеристики позволило снизить средний температурный коэффициент до 0,1—0,2 мгал/градус в диапазоне температур $\pm 10^\circ \text{C}$.

Показания гравиметра снимают при горизонтальном положении рычага. В этом случае сила тяжести, действующая на рычаг, будет наибольшей. Горизонтальность системы определяется с помощью уровней, установленных на корпусе прибора. Если прибор отклонять на определенный угол, то отсчет прибора уменьшается вследствие того, что в этом случае на чувствительную систему будет действовать не полное значение силы тяжести, а ее проекция. Поэтому весьма важно устанавливать уровни так, чтобы они в точности соответствовали горизонтальному положению системы.

В кварцевых астазированных гравиметрах применен визуальный способ отсчета. Оптическая система состоит из осветителя 15—17 и микроскопа 19—22 (рис. 33, е). Луч света от лампочки 15 собирается конденсором 16 и направляется в виде параллельного пучка к наклонному зеркалу 17. Далее луч, отразившись от зеркала, направляется в призму 19, а затем в объектив 20 и окуляр 21. В окуляре микроскопа установлена шкала 22. Изображение индекса 18, встречаемое лучом на своем пути, находится в поле зрения микроскопа в виде подвижной полосы. С помощью микроскопа в гравиметрах достигается 200—800-кратное увеличение изображения. Конструктивно гравиметр выполняется в виде двух частей: средней части, или собственно гравиметра, и внешнего кожуха. Внешний кожух представляет собой стальной цилиндр с установочными винтами вверху. По дну и стенкам цилиндра проложены толстые прокладки из пенопласта, а внутри

цилиндра помещен сосуд Дьюара. Средняя часть гравиметра состоит из корпуса, теплозащитного столба и верхней панели, на которой расположены окуляр микроскопа, отсчетное устройство, уровни, гнездо для диапазонного ключа.

Остановимся на краткой технической характеристике некоторых видов кварцевых астазированных гравиметров.

Гравиметр ГАК-7Т (астазированный кварцевый) предназначен для детальных гравиметрических работ. Погрешность наблюдений с гравиметром составляет 0,06—0,1 мгал, смещение нуля — 0,3—0,4 мгал/ч. Время наблюдения на точке — 2—3 мин, масса прибора 5 кг. Диапазон измерения гравиметра составляет 80—120 мгал без перестройки и 1500—3000 мгал с перестройкой. В приборе достигнуто 200-кратное оптическое увеличение.

Гравиметр ГАК-7Ш (астазированный кварцевый широкодиапазонный) предназначен для региональных гравиметрических работ и создания опорных сетей. Диапазон измерения этого прибора 1000—1500 мгал без перестройки и до 5000 мгал с перестройкой. Прибор имеет узкий диапазон измерений (80—120 мгал). Погрешность измерения силы тяжести в узком диапазоне составляет 0,06—0,1 мгал, а в широком — 0,5 мгал. Смещение нуля системы не превышает 0,3 мгал/ч. Внешне гравиметр ГАК-7Ш отличается от гравиметра ГАК-7Т только наличием второго отсчетного устройства.

Гравиметр ГРК-1 (разведочный кварцевый) — это гравиметр первого класса точности. Погрешность измерения гравиметром — 0,02—0,03 мгал. Смещение нуля — 0,05 мгал. Прибор предназначен для детальных гравиметровых съемок. По устройству он мало отличается от гравиметра ГАК-7Т. Отличие заключается в устройстве температурного компенсатора, связанного с главной пружиной, и наличии 600-кратного оптического увеличения (в ГАК-7Т — 200-кратное оптическое увеличение). Масса прибора 5 кг.

Гравиметр ГРК-2 имеет такое же принципиальное устройство, как и гравиметр ГАК-7Т и отличается более тщательным конструктивным исполнением узлов. Погрешность измерения силы тяжести прибором составляет 0,04—0,6 мгал. Смещение нуля не превышает 0,05 мгал/ч. Масса прибора 5 кг.

3. Гравиметры металлические астазированные

Кроме кварцевых астазированных, в СССР создано несколько типов металлических астазированных гравиметров (ГМТ-1 и ГМТ-2).

Широкодиапазонный гравиметр ГМТ-1 (металлический термостатированный) позволяет производить измерения с перестройкой. Чувствительная система прибора изготовлена из элинвара и представляет собой астазированные пружинные весы, принцип действия которых аналогичен принципу действия кварцевых астази-

рованных гравиметров. Упругая система снабжена барометрическим и температурным компенсаторами и помещена в герметичную камеру. Прибор снабжен двухступенчатым электрическим термостатом и противоманнитным экраном, устраняющим влияние земного магнитного поля на показания прибора.

Погрешность измерений гравиметром составляет 0,15—0,25 мгал при продолжительности рейса до 8 ч. Масса прибора 8 кг, время наблюдения на пункте — 3—5 мин. Прибор предназначен для региональных гравиметровых съемок.

На базе гравиметра ГМТ-1 создана усовершенствованная модель металлического гравиметра ГМТ-2, погрешность измерения которого уменьшена в 2—3 раза и составляет 0,05—0,06 мгал.

Упрощенная схема прибора изображена на рис. 34. К металлическому рычагу 1 с грузом 2 на конце приварены две главные измерительные пружины 3. Каждая из пружин имеет форму параболической спирали. Астазирующее устройство состоит из рычага 4 и пружины 5. Все детали чувствительной системы изготовлены из элинвара. Температурный компенсатор состоит из пружины 6, нижний конец которой приварен к биметаллическому термометру 7.

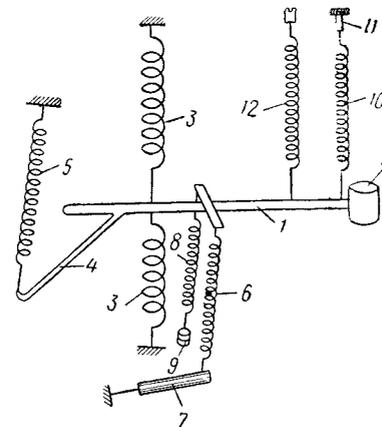


Рис. 34. Принципиальная схема гравиметра ГМТ-2

Барометрический компенсатор представлен пружиной 8 и анероидной коробочкой 9. Принцип действия компенсатора заключается в следующем. При увеличении барометрического давления грузик 2 движется вверх, поворачиваясь одновременно против часовой стрелки. Камера анероида 9 при увеличении давления сжимается, соответственно сжимается и пружина 8, поворачивающая рычаг вниз. Чувствительная система помещена в герметически закрытую оболочку, поэтому показания прибора практически не зависят от барометрического давления.

В приборе применен компенсационный способ отсчета. Маятник выводится в горизонтальное положение с помощью измерительной пружины 10, связанной с микрометренным винтом 11. Для расширения диапазона измерений служит диапазонная пружина 12. Для исключения резких температурных влияний система снабжена двухступенчатым электрическим термостатом. Диапазон измерений с гравиметром составляет 150—200 мгал без перестройки диапазона и 5000 мгал с перестройкой. Смещение нуля не превышает 0,5 мгал/сут. Прибор нормально работает при температуре от +40 до -40° С. Масса прибора 8 кг.

§ 31. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ НАЗЕМНЫХ ГРАВИРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

При подготовке гравиметров к наблюдениям проверяют механическую исправность прибора, определяют установку гравиметра на минимум чувствительности к наклону, находят цену деления прибора, снимают температурную характеристику.

Установка уровней на минимум чувствительности к наклону заключается в совмещении горизонтального положения плоскости, в которой лежат ось вращения и центр тяжести рычага, с нулевым положением уровней. Это положение соответствует максимальному отсчету по шкале прибора.

Ценой деления гравиметра (или ценой оборота винта) называется число миллигал, соответствующее изменению отсчета на одно деление (или повороту микрометрического винта на один оборот). Цену деления прибора определяют по результатам измерений на пунктах с известными значениями силы тяжести. В этом случае цену деления находят путем деления известной разности силы тяжести Δg между двумя пунктами на разность отсчетов Δn между ними:

$$C = \Delta g / \Delta n,$$

где C — цена деления, мгал/дел.

Для повышения точности определения цены деления описанным способом необходимо, чтобы величина разности силы тяжести между пунктами была не менее 30 мгал.

Для определения зависимости показаний прибора от температуры искусственно создают температурные условия, близкие к полевым. Обычно температурную характеристику снимают в термокамере, позволяющей создавать как положительные температуры, так и отрицательные.

В термокамере должно быть прочное основание для установки гравиметра. Температурную кривую строят по данным показаний отсчетного устройства прибора от температуры. Температурный коэффициент определяется отношением приращения силы тяжести к соответствующему изменению температуры.

Измерения с гравиметром на точке производят следующим образом.

Гравиметр устанавливают на специальную подставку или твердый грунт, обеспечивающий устойчивость прибора. Затем включают свет, прибор нивелируют по двум уровням с помощью подъемных винтов. Наблюдая в окуляр за положением индекса маятника, с помощью микрометрического винта добиваются совмещения индекса с нулевым делением шкалы и берут отсчет.

На каждом пункте прибор устанавливают так, чтобы защитить его от прямого действия ветра. Возле пункта наблюдений не должно быть деревьев, работающих двигателей, которые могут быть источниками колебаний почвы. При измерениях сохраняют

по возможности постоянный температурный режим прибора, а также постоянный режим тряски. Нарушение этих условий может вызвать резкие изменения величины нуля. При транспортировке прибора и в обращении с ним, прибор охраняют от резких толчков и ударов.

Для учета сползания нуля приборов и привязки наблюдений к единому общегосударственному уровню на участке создается рабочая опорная сеть. Она опирается на пункты общегосударственной опорной сети, в которых известны абсолютные значения силы тяжести.

На территории СССР разбита государственная сеть опорных пунктов I и II класса. Пункты I класса расположены друг от друга на расстоянии 200—500 км. Расстояние между точками II класса составляет 100—300 км. Создание опорной сети I класса производят с погрешностью 0,10—0,15 мгал, II класса — 0,15—0,2 мгал. Работы по созданию опорной гравиметрической сети выполняют специализированные организации.

Расстояние между точками рабочей опорной сети выбирают таким, чтобы оператор при проведении рядовых рейсов имел возможность брать отсчеты на опорных пунктах через каждые 2—4 ч. В зависимости от масштаба съемки расстояние между опорными точками колеблется от 1 до 20 км.

Пункты опорной сети должны располагаться на площади равномерно, иметь удобные подъезды и хорошо опознаваться. Наблюдения на точках опорной сети выполняются замкнутыми рейсами, включающими один или два исходных опорных пункта общегосударственной сети. Схемы рейсов могут быть различными, опирающимися на один или несколько исходных пунктов.

Точность наблюдений при создании рабочей опорной сети должна быть в 2 раза выше точности рядовых наблюдений. Это достигается применением более совершенной аппаратуры и многократностью наблюдений. Для уменьшения продолжительности рейсов целесообразно применять автомобильный или воздушный транспорт.

Рейсы по созданию опорной гравиметрической сети образуют систему замкнутых полигонов. Кроме точек основной опорной сети, расположенных довольно редко, часто создается вспомогательная опорная сеть по магистральным линиям, объединяющим концы рядовых профилей.

После создания опорной гравиметрической сети приступают к рядовым наблюдениям, для которых опорная сеть является жесткой основой. Для надежного учета нуля все рядовые рейсы должны начинаться и заканчиваться на точках опорной сети. Обычно рядовые наблюдения осуществляют по однократной методике. О величине смещения нуля судят по повторным отсчетам.

Контрольные рейсы проводят по той же методике, что и рядовые. Контрольные рейсы должен выполнять другой оператор

(обычно начальником отряда) с другим прибором по секущим маршрутам, охватывающим первичные наблюдения за несколько дней.

§ 32. КАМЕРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ НАЗЕМНОЙ СЪЕМКИ

Первичная камеральная обработка наблюдений на точках опорной гравиметровой сети включает: вычисление приращений силы тяжести на пунктах опорной сети относительно исходного пункта; вычисление и введение поправки за смещение нуля пункта; уравнивание полигонов; получение абсолютных значений силы тяжести.

Приращение силы тяжести определяют, умножая разницу в отчетах на опорном и исходном пунктах на цену деления гравиметра. Величину поправки за смещение нуля пункта определяют либо аналитически, либо графически. Величина смещения нуля пункта находится путем сравнения значения силы тяжести между двумя опорными точками с полученным в рейсе. Скорость изменения нуля пункта в единицу времени определяется коэффициентом K , который находится путем деления величины нуля пункта $\Delta g_{\text{нп}}$ на продолжительность рейса Δt :

$$K = \Delta g_{\text{нп}} / \Delta t.$$

Продолжительность рейса определяется разницей времени взятия отсчетов на опорных точках.

При этом величина $\Delta g_{\text{нп}}$ в зависимости от схемы рейса находится следующим образом. В случае, если рейс опирается на один и тот же опорный пункт, величина нуля пункта определяется разностью первого n_1 и повторного n'_1 отсчетов на этой точке, умноженной на цену деления C :

$$\Delta g_{\text{нп}} = (n_1 - n'_1) C.$$

В случае, если рейс опирается на две различные опорные точки I и II, между которыми известна истинная величина приращения Δg , то величина нуля пункта определяется путем сравнения истинной Δg с полученной в рейсе:

$$\Delta g_{\text{нп}} = \Delta g - \Delta g',$$

где $\Delta g' = (n_1 - n_{II}) C$; n_I и n_{II} — отсчеты показаний приборов на I и II опорных точках соответственно.

Поправка за нульпункт определяется путем умножения коэффициента изменения нуля пункта на промежуток времени между отсчетами на данном пункте и на исходном опорном. Иногда поправку за нульпункт вводят графически (см. § 19).

Значения приращений силы тяжести, исправленные за смещение нуля пункта, выписываются вдоль соответствующих сторон замкнутого полигона. Далее производят уравнивание опорной

сети. Смысл уравнивания заключается в следующем. Сумма приращений силы тяжести в замкнутом полигоне теоретически должна быть равна нулю. Но поскольку вычисленные значения силы тяжести включают различного рода ошибки, то эта сумма отличается от нуля, содержит так называемую невязку. Невязку необходимо распределить между сторонами полигона таким образом, чтобы сумма приращений в полигоне была равна нулю. В этом заключается смысл уравнивания. Существуют различные способы уравнивания опорных сетей.

Простейший способ заключается в распределении невязки в изолированном полигоне пропорционально числу пунктов. Абсолютное значение силы тяжести в точке определяют, прибавляя к абсолютному значению силы тяжести исходного пункта уравненное значение приращения между этими точками.

Камеральная обработка рядовых наблюдений включает: вычисление приращений силы тяжести; введение поправок за нульпункт; определение абсолютных значений силы тяжести. Все эти операции выполняют так же, как и при обработке опорной гравиметровой сети. В случае, если рядовые наблюдения выполняли без опорной сети, величину коэффициента нуля пункта определяют на основании повторных наблюдений как средневзвешенное:

$$K = \sum \Delta g_i / \sum \Delta t_i,$$

где $\Delta g_i = (n_i - n'_i) C_i$ — величина нуля пункта на i -ой повторной точке; Δt — время между двумя повторными наблюдениями; n_i и n'_i — соответственно первый и повторный отсчеты на i -ой точке.

Обычно для разведочных целей вычисляют аномалии Буге, которые наилучшим образом характеризуют неоднородности верхней части земной коры. Аномалии вычисляют по формуле (13).

Результаты вычисления аномалий изображают в виде карт изоаномал силы тяжести или графиков по профилям в соответствующем масштабе. И з о а н о м а л а м и называют линии равных значений поля силы тяжести. На карте указывают масштаб, вид редукции, плотность промежуточного слоя, название организации, фамилии исполнителей и дату составления.

Кроме карт и графиков, составляют каталог опорных и рядовых пунктов, включающих наблюденные значения силы тяжести и аномалии силы тяжести.

§ 33. ГРАВИМЕТРЫ ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ДНЕ ВОДОЕМОВ

Для относительных измерений силы тяжести на дне рек и озер используются астазированные гравиметры с компенсационным методом отсчета. Поскольку оператор разобщен с прибором во время наблюдений, при конструировании донных гравиметров предусмотрены дистанционное управление упругой системой,

устройства для спуска, установки и подъема прибора. Гравиметр помещают в карданный подвес, с помощью которого систему устанавливают в строго горизонтальном положении. Карданный подвес, в свою очередь, закреплен в водонепроницаемом герметичном корпусе, установленном на треноге. Всю эту установку опускают на дно водоема и соединяют с пультом управления на корабле посредством кабеля. Показания микрометричного винта передаются на пульт управления, а чувствительная система гравиметра выводится в исходное нулевое положение при помощи пружин измерительного устройства, приводимых в движение специальными электродвигателями или электростатическими силами по методу возвратного потенциала.

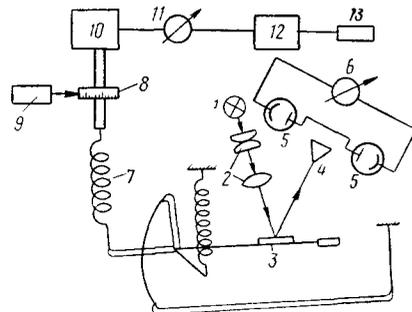


Рис. 35. Схема донного гравиметра ГАК-ДТ

Первый донный гравиметр разработан в СССР в 1949 г. на базе гравиметра ГАК. В дальнейшем было создано несколько конструкций донных гравиметров на базе гравиметров типа ГАК: КДГ-2, КДГ-3, КДГ-ЭМТ, ГАК-ДТ, различающихся способом измерения силы тяжести. В гравиметре КДГ-2 и КДГ-3 приращение силы тяжести измеряется методом возвратного потенциала, а в ГАК-ДТ и КДГ-ЭМТ — с применением электродвигателя. Гравиметр ГАК-ДТ имеет принципиальную схему, изображенную в упрощенном виде на рис. 35. Фоторегистрирующее устройство состоит из лампочки 1, конденсатора 2, зеркала 3 на маятнике, разделительной призмы 4, фотоэлементов 5 и гальванометра 6. Лучи света, отражаясь от зеркала системы 3, попадают на призму 4 в виде узкой полосы. При горизонтальном положении маятника эта полоса делится призмой на две равные доли, в результате чего ток в цепи элементов отсутствует. При отклонении рычага от горизонтальной плоскости световой поток делится призмой на неравные части, и в цепи появляется фототок, регистрируемый гальванометром 6. Величина тока пропорциональна изменению силы тяжести. В приборе применен компенсационный способ отсчета, следовательно, рычаг должен быть приведен в горизонтальное положение с помощью измерительной пружины 7, натяжение которой меняется посредством микрометрического винта 8. В приборе винт приводится в движение автоматически, с помощью электродвигателя 9, соединенного с винтом посредством редуктора.

Измерительная схема состоит из двух потенциометров 10 и 12, гальванометра 11 и счетчика оборотов 13. Ползунок потенциометра 10 жестко связан со штоком микрометрического винта 8.

Изменение сопротивления потенциометра фиксируется счетчиком оборотов 13.

Гальванометры 6, 11, потенциометр 12 со счетчиком 13 и некоторые другие вспомогательные части (не показанные на рис. 35) размещены в пульте управления, на корабле. Остальные части монтируются вместе с гравиметром. Гравиметр с пультом соединен посредством гибкого шланга.

Измерения производят следующим образом. После установки прибора на дне бассейна включают измерительную схему и после проведения необходимых проверок смотрят за положением стрелки гальванометра 6. Если она смещена от нулевого положения, включают электродвигатель 9, который работает до тех пор, пока стрелка не установится на нуле. Показания прибора снимают со счетчика 13. Упругая система прибора помещена в сосуд Дьюара, который вставляется в теплозащитный корпус. Прибор устанавливают в скафандре, на кардановом подвесе. Погрешность измерений прибором 0,2—0,3 мгал. Масса гравиметра со скафандром 120 кг.

§ 34. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВАРИОМЕТРЫ И ГРАДИЕНТОМЕТРЫ

Для решения геологических задач используют вторые производные гравитационного потенциала

$$W_{xz} = \frac{\partial g}{\partial x}, \quad W_{yz} = \frac{\partial g}{\partial y},$$

которые измеряют с помощью гравитационных вариометров и горизонтальных градиентометров. Кривизны $W_{\Delta} = W_{yy} - W_{xx}$ и $2W_{xy}$, измеряемые гравитационными вариометрами, используются при специальных геодезических исследованиях.

Поэтому при изложении материала, касающегося измерений вторых производных гравитационного потенциала, основное внимание будет уделено вопросам измерения горизонтальных градиентов.

1. Принцип действия и основы теории гравитационных вариометров

Чувствительной системой вариометров и градиентометров служат крутильные весы Этвеша, представляющие собой легкое коромысло с грузиками на концах, расположенных на разных высотах. Коромысло подвешено на очень тонкой металлической нити, на которой оно совершает крутильные колебания. Формы применяемых в вариометрах и градиентометрах коромысел различные (рис. 36).

Если крутильные весы, подвешенные на нити, поместить в однородное гравитационное поле, где сила тяжести во всех точках пространства одинакова, то на грузики коромысла будут

действовать равные силы, уравновешивающие друг друга. Веса будут находиться в положении, при котором нить подвеса полностью раскручена. Допустим теперь, что вблизи чувствительной системы расположено тело P с избыточной массой, создающее гравитационное поле (рис. 37). Напряженность поля в точках 1 и 2 пространства, в которых расположены массы грузиков коромысла 3, неодинакова, так как неодинаковы расстояния r_1 и r_2 от центра тела до центров грузиков.

Выберем систему координат следующим образом: начало расположим в центре тяжести (ЦТ) крутильной системы, ось x направим параллельно оси коромысла, ось y — перпендикулярно к нему, ось z — отвесно вниз. Разложим силы g_1 и g_2 на составляющие по координатным осям (рис. 37). Силы W_{x1} и W_{z1} , W_{y1} и W_{z2} заметного действия на систему не оказывают, так как первые действуют вдоль коромысла, стремясь растянуть или сжать его, а вторые стремятся повернуть систему вокруг горизонтальной оси. Основное действие на грузики оказывают силы W_{y1} и W_{y2} , поворачивающие систему вокруг вертикальной оси до тех пор, пока их действие не будет уравновешено упругими силами нити 4. Угол поворота системы от первоначального положения весьма мал (обычно не превышает 1°). Его фиксируют с помощью зеркала 5, жестко скрепленного с коромыслом, и отсчетного устройства. Величина отсчета будет пропорциональна разности приложенных сил $W_{y2} - W_{y1}$ или при постоянном расстоянии между грузиками Δz по вертикали пропорциональна $\lim (W_{y2} - W_{y1})/\Delta z = d^2W/dydz = W_{yz}$, т. е. второй производной гравитационного потенциала по y и z .

Если теперь коромысло повернуть на 90° относительно строго фиксированной системы координат, основное действие на грузики будут оказывать составляющие W_{x1} и W_{x2} и, следовательно, в этой ориентировке системы может быть определена W_{xz} .

При произвольном угле поворота оси коромысла относительно оси x системы на грузики будут действовать одновременно горизонтальные составляющие W_{x1} , W_{x2} , W_{y1} и W_{y2} . Общее уравнение для гравитационного вариометра, произвольно ориентированного относительно оси x , записывается в виде

$$n_1 - n_0 = a \left(W_{xy} \cos 2\varphi + \frac{W_{\Delta}}{2} \sin 2\varphi \right) + b (W_{yz} \cos \varphi + W_{xz} \sin \varphi); \quad (14)$$

где n_0 — отсчет, соответствующий положению системы в однородном поле; n_1 — отсчет, соответствующий положению системы

в неоднородном поле; a , b — постоянные прибора, зависящие от формы, материала и размеров коромысла; φ — угол между осью коромысла и осью x ; W_{xy} , W_{Δ} — вторые производные, характеризующие кривизну уровенной поверхности; W_{xz} , W_{yz} — горизонтальные градиенты силы тяжести.

Постоянные прибора известны, угол φ измеряют с помощью буссоли, отсчет n_1 берется по прибору. Таким образом, в уравнении (14) остается пять неизвестных: W_{xy} , W_{Δ} , W_{yz} , W_{xz} и n_0 . Чтобы найти эти неизвестные, необходимо составить систему из пяти уравнений. Для этого достаточно выполнить наблюдения в пяти различных азимутах φ .

Продолжительность наблюдений с вариометром зависит от времени успокоения коромысел, в течение которого оно совершает в основном вращательные движения вокруг вертикальной оси. Время же успокоения коромысел определяется чувствительностью прибора, которая диктуется необходимой точностью определения вторых производных гравитационного потенциала.

Практически для измерения вторых производных с погрешностью 2—5 Е время успокоения коромысел составляет 20—30 мин. Следовательно, чтобы провести измерения с вариометром в пяти азимутах, потребуется 2—3 ч. Для сокращения времени наблюдения на точке в вариометрах применяют не одну, а две крутильные системы, что позволяет в каждом азимуте иметь два независимых уравнения, а для получения всех неизвестных достаточно произвести наблюдения в трех азимутах.

В гравитационных градиентометрах используют коромысло, у которого расстояние от оси вращения до грузиков очень мало (0,5 см) по сравнению с вертикальным расстоянием между ними (40 см). Такая система обладает меньшим периодом собственных колебаний, но и меньшей чувствительностью. Время успокоения коромысел градиентометра составляет 3 мин, что в 6—8 раз меньше времени успокоения коромысел вариометров, а точность измеряемых вторых производных вдвое ниже.

Уравнение равновесия крутильной системы градиентометра имеет более простой вид, так как коэффициент a в уравнении (14)

Рис. 36. Различные типы крутильных весов

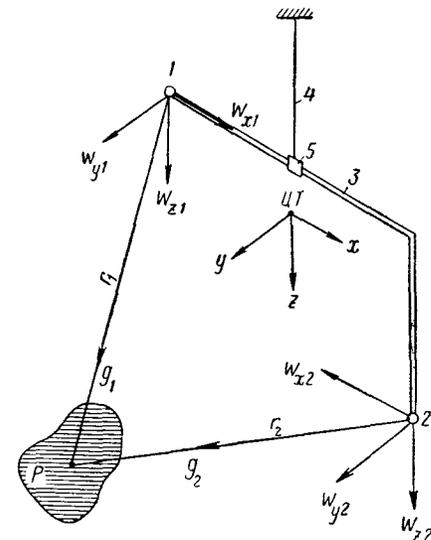
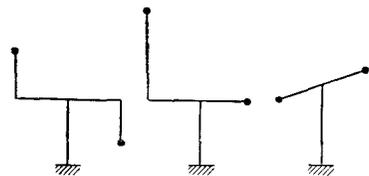


Рис. 37. Принципиальная схема измерения вторых производных гравитационного потенциала

близок к нулю, поэтому членом, содержащим a , в уравнении можно пренебречь. Тогда уравнение равновесия (14) для градиентометра запишется в виде

$$n_1 - n_0 = b (W_{yz} \cos \varphi + W_{xz} \sin \varphi). \quad (15)$$

Следовательно, градиентометром можно измерять лишь горизонтальные градиенты. В градиентометре установлены четыре крутильные системы, значит, измерение на точке содержит шесть неизвестных: n^1_0 , n^2_0 , n^3_0 , n^4_0 , W_{xz} и W_{yz} . Чтобы найти эти неизвестные, достаточно провести наблюдения в двух азимутах, что позволит иметь восемь уравнений. Для повышения точности наблюдения могут быть проведены в трех азимутах.

Вторые производные гравитационного потенциала изменяются обратно пропорционально кубу расстояния до протягивающих масс, первая производная гравитационного потенциала (сила тяжести) обратно пропорциональна квадрату расстояния. Это приводит к тому, что влияние масс быстро уменьшается с увеличением расстояния до них. Поэтому измерение вторых производных применяют для выявления рудных тел, залегающих на небольших глубинах. Основной помехой при проведении вариометрической съемки является влияние рельефа местности, вследствие чего наблюдения с вариометром лучше всего проводить в условиях спокойного рельефа.

2. Краткая характеристика аппаратуры для вариометрической съемки

Конструкция вариометров и градиентометров должна обеспечивать возможность установки системы в различных азимутах и регистрацию положения коромысел в положении равновесия. Вариометр состоит из трех частей. В верхней части размещены крутильные системы, помещенные на определенной высоте от поверхности Земли в специальный корпус, а также элементы оптической схемы. Верхняя часть установлена на среднюю, которая служит для ориентировки прибора в заданном направлении и автоматического перевода прибора из одного азимута в другой. В нижней части размещена колонка.

Положение коромысел в вариометрах регистрируется на фотопластинке с помощью оптической системы.

Градиентометры, в отличие от вариометров, не имеют автоматических устройств для перевода прибора из азимута в азимут, так как время наблюдений с градиентометром невелико и эта операция выполняется наблюдателем. Отсчеты по шкалам прибора берутся визуально.

Вариометрами и градиентометрами измеряют весьма малые величины, поэтому систему стараются предохранить от внешних влияний. Чтобы обеспечить хорошую теплозащиту, коромысло

помещают в многослойные футляры. Для защиты от влияния магнитного поля, чувствительные системы изготавливают из немагнитного материала.

Наибольшее распространение в практике вариометрических работ нашли вариометры S-20, Z-40 и E-60. Они различаются формой коромысел, временем их успокоения и конструктивными особенностями. Время успокоения коромысел в вариометре S-20 составляет 20 мин, погрешности измерений 2—3 Е. Время успокоения коромысел в Z-40 составляет 40 мин, в E-60 — 20 мин, а погрешность измерения производных с этими приборами составляет 1—2 Е.

Быстродействующий высокопроизводительный градиентометр ГРБМ-2 предназначен для измерения горизонтальных производных силы тяжести. Время наблюдения на точке составляет 12—15 мин, погрешность измерения 7—10 Е. Чувствительная система прибора состоит из четырех коромысел типа Z, повернутых относительно друг друга на 90°. Такое расположение систем позволяет в двухазимутальном цикле получать по два независимых значения величин W_{xz} и W_{yz} . Коромысло градиентометра представляет собой вертикальную дюралюминиевую трубку с грузиками на концах. Коромысло подвешено на вольфрамовой нити, которая нижним своим концом прикреплена к середине коромысла, а верхним — к крутильной головке. Крутильная головка позволяет регулировать систему, меняя положение коромысла по высоте и по азимуту. Для сокращения времени успокоения коромысла снабжены демпфирующими приспособлениями.

Для предотвращения повреждений системы в приборе предусмотрено арретирующее приспособление, которое закрепляет все четыре коромысла одновременно. Каждая крутильная система помещена в отдельную камеру, а все четыре системы монтируются в одном корпусе.

Оптическая система прибора состоит из четырех одинаковых оптических каналов, одной зрительной трубы и четырех одинаковых параллельных шкал.

При работе с градиентометром оператор сам включает на короткое время осветители и переводит прибор из азимута в азимут.

Прибор состоит из собственно градиентометра (верхняя часть), колонки и диска. Колонка предназначена для установки прибора и ориентировки его по азимуту. Она состоит из основания, азимутального круга и столика. Азимутальный диск может свободно вращаться или быть застопорен винтом. Вместе с диском может вращаться и верхняя часть прибора, которая устанавливается на столике колонки. Для этого столик соединяют с азимутальным кругом.

На азимутальном круге ГРБМ-2 имеются четыре неглубокие лунки, расположенные через 90°. При вращении прибора вокруг своей оси в эти лунки западает шарик, затормаживающий прибор

в нужном азимуте. Наблюдения с градиентометром обычно проводят в двух азимутах, а в четырех азимутах берут отсчеты только для контроля показаний прибора.

3. Полевые наблюдения с градиентометром и обработка результатов

Работа с градиентометром на точке включает следующие операции.

Колонку прибора устанавливают на сферический диск или на забитые в землю колья. Колонку грубо нивелируют с помощью круглого уровня. На колонку устанавливают верхнюю часть прибора, столик соединяют винтом с азимутальным кругом, так что прибор, установленный на столике колонки, получает возможность свободного вращения вокруг вертикальной оси. Далее прибор нивелируют с помощью уровней и ориентируют с помощью буссоли, вращая прибор вместе с азимутальным кругом. По окончании ориентировки азимутальный круг зажимают стопорным винтом, прибор считается ориентированным в начальном (нулевом) азимуте. Далее системы дезарритируют, спустя 2,5—3 мин включают свет и берут отсчет по всем четырем шкалам (сверху вниз) с погрешностью 0,5 деления. Затем прибор переводят в другой азимут, отмечают время, и наблюдения повторяют.

После получения наблюдений во всех четырех азимутах оператор вычисляет разность отсчетов в двух азимутах (0 и 180° или 90 и 270°) и умножает ее на цену деления. Погрешность наблюдений оценивается по разности значений одного и того же градиента, которая не должна превышать 20 Е. В противном случае наблюдения повторяют. Ниже приводятся формулы, по которым вычисляются вторые производные.

I коромысло (верхняя шкала в поле зрения зрительной трубы)

$$W_{xz} = C_I (n_{270} - n_{90}), \quad W_{yz} = C_{II} (n_0 - n_{180}).$$

III коромысло (вторая шкала сверху)

$$W_{xz} = C_{III} (n_{180} - n_0), \quad W_{yz} = C_{III} (n_{270} - n_{90}).$$

IV коромысло (третья шкала сверху)

$$W_{xz} = C_{IV} (n_{180} - n_0), \quad W_{yz} = C_{IV} (n_{270} - n_{90}).$$

II коромысло (четвертая шкала сверху)

$$W_{xz} = C_{II} (n_{270} - n_{90}), \quad W_{yz} = C_{II} (n_0 - n_{180}).$$

В вычисленные средние значения градиентов вводятся поправки за нормальное поле и за влияние рельефа местности.

Поправка за нормальное поле зависит от географической широты φ района работ и от направления ориентировки оси x прибора относительно меридиана. В случае, если ориентировка

прибора совпадает с направлением астрономического меридиана, то поправки вычисляются по формулам (10)—(12), если же не совпадает, — по формулам

$$W_{xz} = (W_{xz})_0 \cos A, \quad W_{yz} = -(W_{yz})_0 \sin A,$$

где A — азимут ориентировки прибора.

Топографическую поправку вычисляют на основании определения превышений окружающей местности по результатам нивелирования. Так как поправки за влияние рельефа убывают пропорционально третьей степени расстояния от пункта наблюдения,

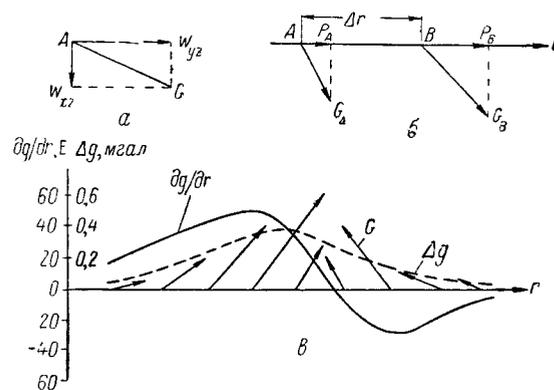


Рис. 38. Изображение результатов измерения вторых производных гравитационного потенциала

то особенно тщательно поправку за рельеф определяют в радиусе 50—100 м. Поправку же за удаленный рельеф находят приблизительно и учитывают только при высокоточных измерениях. Наибольшее распространение имеет способ Б. В. Нумерова, в котором нивелирование производится в точках, расположенных на радиусах 0; 1,2; 2; 2,3; 4,5; 6; 10; 18; 50; 100 м, в местах пересечения этих радиусов с лучами, проведенными через 90 или 45°. Существуют специальные таблицы и формулы, с помощью которых, зная превышения в указанных точках, можно вычислить топографическую поправку в точке наблюдения.

Результаты вычисленных аномальных значений градиентов изображают в виде карт векторов горизонтальных градиентов, векторов и кривых градиента по профилям (рис. 38), а также в виде графиков Δg и карт изоаномал силы тяжести.

Векторы горизонтальной составляющей градиента силы тяжести вычисляют по формуле

$$G = \frac{\partial g}{\partial S} = \sqrt{W_{xz}^2 + W_{yz}^2}.$$

Практически вектор G строится как геометрическая сумма векторов W_{xz} и W_{yz} (рис. 38, а) с соблюдением ориентировки и знаков. Начало вектора совпадает с пунктом наблюдения А.

По полученным векторам в разрезе можно построить кривую вектора составляющей dg/dr , для чего векторы G проектируют на направление профиля, причем значение проекции dg/dr откладывают вверх, если ее направление совпадает с направлением профиля, и вниз, если проекция имеет противоположное направление (рис. 38, *в*).

Приращение силы тяжести между двумя точками A и B , в которых известно значение G_A и G_B вычисляют по формуле

$$\Delta g_{AB} = (P_A + P_B/2) \Delta r,$$

где P_A и P_B — проекции векторов G_A и G_B на направление r ; Δr — расстояние между точками A и B (рис. 38, *б*).

§ 35. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Плотность пород определяют различными способами. Наиболее распространенным является способ гидростатического взвешивания, который заключается в следующем. Если образец взвесить на чашке технических весов вначале в воздухе, а затем, поместив его в воду, то плотность образца можно найти по формуле

$$\sigma = P_1 / (P_1 - P_2),$$

где P_1 и P_2 — масса образца соответственно в воздухе и в воде. Для взвешивания сильно пористых образцов их предварительно парафинируют. Тогда значение плотности образца находят по формуле

$$\sigma = \frac{P_1}{P'_1 - P_2 - \frac{P_1 - P_2}{\sigma_n}},$$

где P_1 — масса парафинированного образца в воздухе; σ_n — плотность парафина.

На способе гидростатического взвешивания основано устройство специального прибора — денситометра Н. Н. Самсонова. Денситометр представляет собой весы (рис. 39) с коромыслом ломаной формы, плечи которого AO и OB равны и образуют между собой угол $(180^\circ - \varphi)$.

Если образец массой P_1 (рис. 39, *а*) уравновесить произвольным грузом P , то положение равновесия выразится уравнением

$$p \cos \alpha_1 = P_1 \cos (\varphi - \alpha_1),$$

где α_1 — угол, при котором стрелка весов устанавливается против фиксированного индекса I .

Погрузим теперь образец в воду (рис. 39, *б*) и, не изменяя массы груза P , запишем новое уравнение равновесия

$$P \cos \alpha_2 = P_2 \cos (\varphi - \alpha_2),$$

где P_2 — масса образца в воде.

Учитывая, что

$$\sigma = P_1 / (P_1 - P_2),$$

найдем

$$\sigma = \frac{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1} = f(\alpha_2),$$

т. е. плотность зависит только от угла α_2 , так как φ и α_1 — углы постоянные. Шкала денситометра проградуирована не в значениях плотности. При определении плотности образцов пород на денситометре вначале уравновешивают образец произвольным грузом так, чтобы стрелка остановилась против индекса I . Затем образец помещают в сосуд с водой и снимают по шкале измеренное значение плотности.

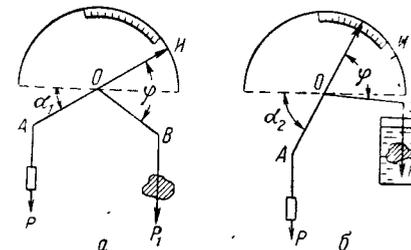


Рис. 39. Принципиальная схема денситометра Н. Н. Самсонова

Среднеквадратическая погрешность определения плотности способом гидростатического взвешивания на технических весах составляет $0,01 \text{ г/см}^3$, а с помощью денситометра — $0,01-0,02 \text{ г/см}^3$. Однако производительность определений с денситометром намного выше, так как отпадает необходимость в вычислениях плотности.

§ 36. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Исходными материалами для выполнения интерпретации гравиразведочных данных являются планы изоаномал и графики Δg по отдельным интерпретационным профилям, геологические разрезы и карты, результаты изучения физических свойств горных пород, материалы других геофизических съемок, применявшихся в комплексе с гравиразведочными исследованиями. Процесс интерпретации гравиразведочных данных можно подразделить на три основных этапа: предварительное качественное истолкование, выделение локальных аномалий и количественная интерпретация.

1. Качественная интерпретация аномалий

Качественная интерпретация заключается в изучении характера гравитационного поля и в установлении его связи с геологическим строением участка. При описании гравитационного поля

2. Выделение локальных аномалий

отмечается форма аномалий, их простирание, примерные размеры, амплитуда. Как и в магниторазведке, гравитационные аномалии подразделяются по форме на изометричные, вытянутые и аномалии контакта. Аномалии указанных форм могут быть как положительными, так и отрицательными, причем положительные аномалии соответствуют местоположению более плотных пород по сравнению с вмещающими, отрицательные — менее плотных. Форма аномалий непосредственно связана с формой возмущающих геологических тел. Так, изометричные аномалии могут быть созданы соляными куполами, кимберлитовыми трубками, линзовидными и гнездобразными рудными залежами, интрузивными телами, штоками. Вытянутые аномалии, длина которых в несколько раз превышает их ширину, могут быть обусловлены антиклинальными и синклинальными складками, пластообразными телами. Контакты пород, различающихся по плотности, характеризуются зонами резких градиентов поля. Такое поле может вызывать сбросы, области сочленения крупных разнородных структур, контакты крупных интрузий с вмещающими породами и т. д.

Сопоставляя планы изоаномал с геологической картой, а графики Δg с геологическими разрезами, устанавливают связь гравитационных аномалий с теми или иными комплексами пород, отмечают особенности поля, которые могут указывать на наличие разломов, уступов или отдельных рудных тел. По характеру гравитационного поля можно не только устанавливать связь поля с геологическим строением участка, но также приближенно судить о глубине возмущающих объектов и угле их падения. Учитывая, что с увеличением глубины залегания тела увеличивается ширина наблюдаемой на поверхности аномалии от него, а градиент поля при этом уменьшается (кривые имеют плавный вид с широким максимумом), можно примерно определять глубину залегания тела.

Так, наибольшая глубина залегания верхней кромки возмущающего тела может быть оценена по приближенной формуле

$$h \leq \frac{\alpha \Delta g_{\max}}{|\Delta g'_{\max}|},$$

где $\alpha = 0,7$ для вытянутых и $\alpha = 0,9$ для изометричных тел, Δg_{\max} и $\Delta g'_{\max}$ — максимальная аномалия силы тяжести и максимальный горизонтальный градиент, снятые с графика Δg , проходящего вкост простирания тела.

При вертикальном падении тела наблюдаемая над ним аномалия имеет симметричный вид, при наклонном падении аномалии становятся асимметричными. Причем при наличии сведений о плотности пород можно судить о направлении падения тел.

Поскольку объектом исследования являются верхние слои земной коры (от первых сотен метров до 3—5 км), то интересующие нас аномалии сравнительно невелики по площади. Они обычно проявляются на фоне плавных (региональных) аномалий, обусловленных влиянием крупных геологических образований. Деление аномалий на региональные и локальные чисто условное и зависит от масштаба съемки и конкретных геологических задач.

Если задачей гравиметровой съемки является мелкомасштабное геологическое картирование, то гравиметровое поле должно быть преобразовано таким образом, чтобы выделяемые аномалии были соизмеримы с размерами изучаемых геологических структур. При крупномасштабных же поисковых работах главный интерес представляют сравнительно небольшие по площади локальные аномалии. Для их четкого выделения все другие, более крупные гравиметровые аномалии должны быть исключены.

В настоящее время разработано много способов преобразования (трансформации) гравитационных полей. Простейшим из них является графический способ, основанный на визуальном графическом сглаживании поля. Практически на карте наблюдаемого поля выбирают ряд параллельных профилей, по которым строят кривые Δg . Анализируя их, проводят линии регионального фона. Снимая затем с этих линий значения региональных аномалий в точках, выбранных через определенные расстояния, переносят эти значения на гравиметровую карту, где проводят изолинии регионального фона. Локальные аномалии получают, вычитая из наблюдаемого поля значения регионального фона.

Способ графического сглаживания применяют при сравнительно простом характере поля. Получаемый региональный фон при графическом сглаживании аномалий зависит от опыта интерпретатора и различными исполнителями может быть определен по-разному.

Наряду с графическим способом разделения аномалий, существуют другие, более строгие способы, например способы осреднения и вариаций. Сущность способа осреднения состоит в следующем. Наблюдаемое гравитационное поле осредняют в пределах площадки со стороной $2a$ (рис. 40) или в пределах круга радиусом R . Значения поля снимают в узлах площадки или круга, после чего все значения складывают, делят на число точек и вычисляют среднее значение $\Delta g_{\text{ср}}$ для центральной точки круга или площадки: $\Delta g_{\text{ср}} = \sum_1^n \frac{\rho_i}{n}$. Значение $\Delta g_{\text{ср}}$ отражает действие региональной составляющей наблюдаемого поля, так как мелкие неоднородности поля, соизмеримые с размером площадки, при суммировании ослабевают. При этом предполагается, что региональная составляющая изменяется линейно.

Таким образом, при осреднении выделяются плавно меняющиеся аномалии и исключаются мелкие аномалии, связанные плотностными неоднородностями верхних частей разреза. Аномальное значение силы тяжести в точке A определяется как разность между значением наблюдаемого поля в точке A и вычисленного в этой точке среднего значения $\Delta g_{\text{ср}}$ ($\Delta g_a^A = \Delta g^A - \Delta g_{\text{ср}}^A$). Величины аномалий, получаемых способом осреднения, зависят от величин R и a , которые называются радиусом осреднения. Наилучшие результаты получают тогда, когда в пределах площадки попадает достаточно большое число положительных

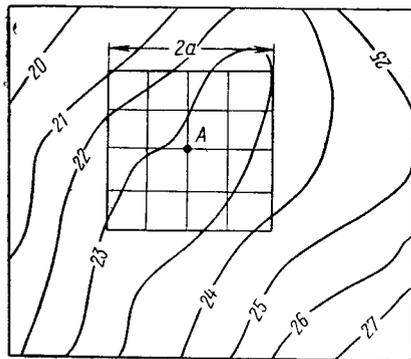


Рис. 40. Разделение аномалий способом осреднения

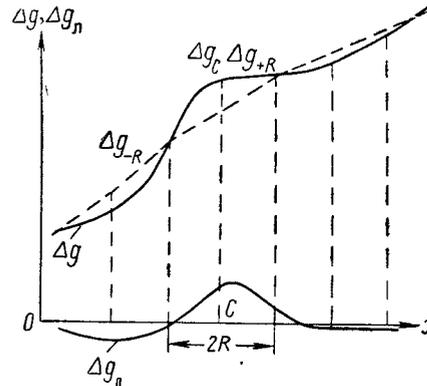


Рис. 41. Разделение аномалий способом вариаций

и отрицательных аномалий, причем они по площади в несколько раз меньше площади выделяемых региональных аномалий. При слишком маленьком радиусе осреднения региональная составляющая искажается влиянием локальной составляющей, а при слишком большом радиусе может оказаться, что региональная составляющая изменяется по сложному закону и оказывает весьма ощутимое действие на величину $\Delta g_{\text{ср}}$. На практике обычно величину радиуса осреднения выбирают на основании опытных расчетов.

Способ вариаций применяется для выделения локальных аномалий. Локальная аномалия вычисляется по формуле

$$\Delta g_n = \Delta g_c - \frac{\Delta g_{-R} + \Delta g_{+R}}{2},$$

где Δg_c — значение силы тяжести в точке C (рис. 41); Δg_{-R} , Δg_{+R} — значения силы тяжести на концах радиуса R .

Локальные аномалии, обусловленные массами, лежащими на глубине R , способом вариаций выделяются достаточно четко, в то время как плавные гравитационные аномалии исключаются. Оптимальная величина радиуса R в способе вариаций определяется примерно соотношением $R = (0,7-1)L$, где L — ширина выделяемой локальной аномалии на половине ее амплитуды.

Следует подчеркнуть, что любые трансформации, применяемые в разведочной гравиразведке, не несут какой-либо новой информации, а используются лишь для того, чтобы выделить те или иные особенности наблюдаемых полей, связанные с геологическим строением района.

Планы локальных аномалий, построенные путем разделения полей одним из описанных способов или какими-либо другими существующими способами, используются, наряду с планами изоаномал, при качественной интерпретации. Количественные расчеты проводятся с целью уточнения параметров тел. При количественной интерпретации наибольшее применение на практике нашли способы аналитические и подбора.

Аналитические способы основаны на использовании формул, выражающих гравитационное действие тел правильной геометрической формы, которыми аппроксимируются реальные геологические тела.

3. Количественная интерпретация аномалий

Рассмотрим аналитические способы решения обратной задачи для некоторых простейших геометрических форм. Гравитационное влияние сферического тела рассчитывается по формуле

$$\Delta g = fM \frac{h}{r^3},$$

где M — избыточная масса тела; h — глубина залегания центра сферы; f — гравитационная постоянная; $r = \sqrt{h^2 + x^2}$, x — абсцисса произвольной точки на оси x (рис. 42, а).

Максимум кривой находится над центром шара и равен $\Delta g_{\text{max}} = fM/h^2$. Для точки, удаленной от центра шара на расстояние $x_{0,5}$, значение силы тяжести в которой составляет половину максимального значения ($\Delta g_{0,5} = 0,5 \Delta g_{\text{max}}$), можно записать

$$\Delta g_{0,5} = fM \frac{1}{2h^2} = \frac{fMh}{(x_{0,5}^2 + h^2)^{3/2}}, \text{ или } 2h^3 = (x_{0,5}^2 + h^2)^{3/2}.$$

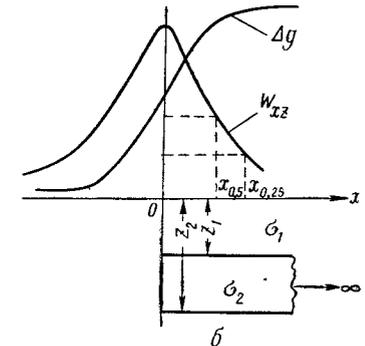
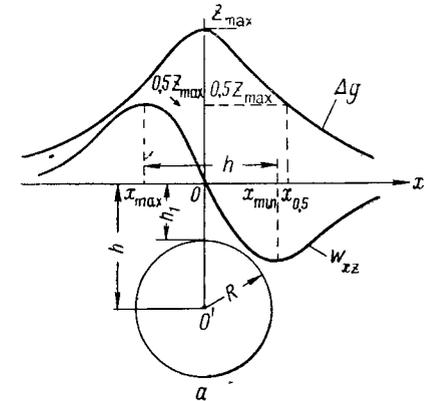


Рис. 42. Кривые Δg и W_{xz} над сферой (а) и вертикальным уступом (б)

Гравитационное влияние сферического тела рассчитывается по формуле

Отсюда глубина залегания центра сферы определяется по формуле $h = 1,31 x_{0,5}$, а избыточная масса

$$M = \Delta g_{\max} h^2 / f.$$

Параметры h и M могут быть определены и по кривой W_{xz} , для чего используют абсциссы экстремальных значений W_{xz} ($h = x_{\min} - x_{\max}$). Избыточную массу находят по формуле:

$$M = 1,16 h^3 (W_{xz})_{\max} / f.$$

Так как $M = (4/3) \pi R^3 \Delta \sigma$, то, зная избыточную плотность сферы, можно найти ее радиус R . Зная избыточную массу тела, его избыточную и истинную плотности, можно найти его полную массу (прогнозные запасы) по формуле

$$M_n = M (\sigma / \Delta \sigma).$$

В случае горизонтального кругового цилиндра глубина до центра сечения h по кривой Δg определяется из равенства $h = x_{0,5}$, а по кривой $W_{xz} - h = 0,87 (x_{\min} - x_{\max})$.

Избыточная масса единицы длины цилиндра λ определяется по формуле

$$\lambda = 0,00749 h \Delta g_{\max} = 0,011 h^2 (W_{xz})_{\max}.$$

Так как избыточная масса единицы длины цилиндра $\lambda = \pi R^2 \Delta \sigma$, то, зная избыточную плотность $\Delta \sigma$, легко найти радиус поперечного сечения цилиндра R . Зная истинную плотность вещества, находят полную массу единицы длины цилиндра

$$\lambda_n = \lambda (\sigma / \Delta \sigma),$$

а прогнозные запасы определяют, умножая λ_n на длину тела, которую можно определить по плану изоаномал или другим данным.

Часто встречающиеся тектонические нарушения типа сбросов, бортовые части крупных интрузий, куполов уподобляются вертикальному уступу. Под вертикальным уступом понимают тело бесконечного простираения, ограниченное двумя горизонтальными и одной вертикальной плоскостями (рис. 42, б). При решении обратной задачи пользуются соотношениями $\Delta g = 0$ при $x = -\infty$, $\Delta g = f \sigma \pi (h_2 - h_1)$ при $x = 0$ и $\Delta g = 2f \sigma \pi (h_2 - h_1)$ при $x = +\infty$. Из этих соотношений можно определить амплитуду сброса

$$h_2 - h_1 = \frac{\Delta g_{\max}}{2f \sigma \pi}.$$

Положение проекции вертикальной плоскости сброса соответствует абсциссе точки, в которой $\Delta g = \Delta g_{\max} / 2$.

Более полную информацию о параметрах уступа можно получить по кривой W_{xz} , которая позволяет определить глубину

залегания верхней и нижней кромок уступа и избыточную плотность по формулам

$$h_1 = m - \sqrt{m^2 - x_{0,5}^2}, \quad h_2 = m + \sqrt{m^2 - x_{0,5}^2},$$

$$m = \frac{x_{0,25}^2 - x_{0,5}^2}{2x_{0,5}},$$

где $x_{0,5}$ и $x_{0,25}$ — абсциссы точек наблюдения, в которых W_{xz} достигает 0,5 и 0,25 своего максимального значения.

Интерпретация гравитационных аномалий по аналитическим формулам, рассчитанным для тел правильных геометрических форм, зачастую позволяет определять параметры тел лишь весьма ориентировочно. Для уточнения формы тела и его пространственного положения в практике интерпретации широко применяется способ подбора, сущность которого заключается в отыскании тела такой формы и такой плотности, рассчитанная кривая от которого совпадает с наблюдаемой кривой. Гравитационный эффект от тела с произвольной формой поперечного сечения может быть рассчитан с помощью специальных палеток.

Существуют различные палетки для вычисления силы тяжести и ее производных. Сущность построения палеток сводится к тому, что вся плоскость ниже исходной оси разбивается на элементарные площадки равного действия, гравитационное влияние которых рассчитывается с помощью точных или приближенных аналитических формул. С помощью построенной таким образом палетки любое тело может быть разбито на элементы, оказывающие на расчетную точку одинаковое гравитационное влияние. Подсчитав сумму элементов и умножив ее на гравитационное влияние одного элемента, получим гравитационное влияние всего тела. Очевидно, таким образом могут быть рассчитаны кривые от любого количества тел в разрезе, причем общее гравитационное влияние разреза находится путем суммирования влияний отдельных тел, различающихся по плотности.

Существуют палетки для двумерных тел, т. е. таких, у которых простираение велико, и для ограниченных по простираению трехмерных тел. Широкое распространение нашла палетка Д. С. Юнга и набор палеток Δg К. Ф. Тяпкина для ограниченных тел. На палетках точками показываются центры площадок равного действия. Цена одной точки палетки равна 1 мгал при избыточной плотности $\Delta g = 1 \text{ г/см}^3$ и масштабе 1 : 100 000. Цена точки C при любой другой плотности и другом масштабе определяется по формуле

$$C = \sigma (M / M_0),$$

где σ — избыточная плотность пород разреза; M — масштаб разреза; M_0 — масштаб палетки.

В настоящее время при обработке и интерпретации результатов гравиметровой съемки применяются электронно-вычисли-

тельные машины. С их помощью ведут первоначальную обработку рейсов, уравнивание опорной сети, вычисление редуций поля, построение планов изоаномал, трансформации поля (выделение локальных аномалий, региональных аномалий, пересчеты ниже и выше уровня наблюдений), решение обратной задачи различными способами, прямой задачи от разреза и объемной модели, составленных в результате интерпретации.

Необходимую информацию для обработки на ЭВМ представляют в вычислительный центр в виде числовых значений по квадратной сетке или по профилям наблюдений, или в виде таблицы. В вычислительном центре эти данные набивают на перфокарты или перфоленту. В таком виде она хранится долгое время и может быть введена в память машины большое число раз для выполнения расчетов по различным программам различными способами. Результаты расчетов на выходе машины печатаются в виде таблицы или с помощью специальных графопостроителей, подключаемых к выходу, вычерчиваются в виде графиков или планов изолиний. Применение ЭВМ ведет к сокращению времени обработки и затраты на нее, повышению точности и объективности результатов съемки.

4. Примеры применения гравиразведки

Гравиразведка применяется для изучения глубинного строения земной коры, поисков нефтегазоносных и угленосных

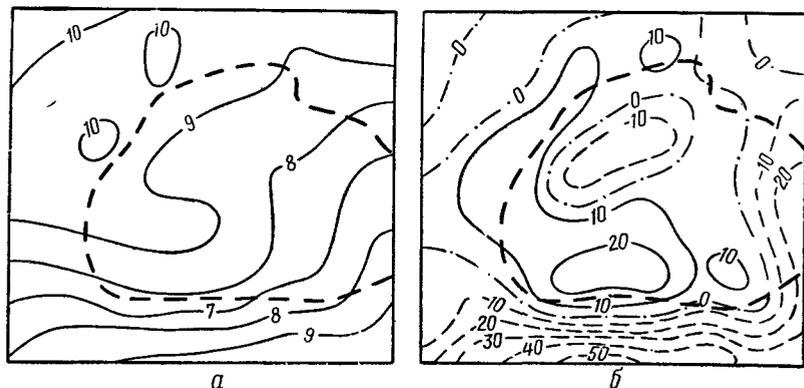


Рис. 43. Карты поля силы тяжести в миллигаллах (а) и вертикального градиента в этвешах (б) в районе нефтяного месторождения (пунктиром показан контур нефтяной залежи)

структур и рудных месторождений (железа, медноколчеданных руд, хромитов). Наиболее благоприятными условиями применения гравиразведки являются крутые контакты аномалеобразующих объектов.

При современной точности гравиметровой съемки (до 0,1 мгал) разделение геологических образований возможно лишь в случае, если их разница в плотностях составляет не менее 0,03—0,05 г/см³. Пример применения гравиразведки в комплексе с магниторазведкой для расчленения интрузии показан на рис. 26, а на рис. 43 иллюстрируются планы изоаномал и вертикальной производной силы тяжести в районе нефтяного месторождения. Контур залежи, имеющей пониженную плотность, отчетливо отмечается минимумом силы тяжести.



Рис. 44. График поля силы тяжести над угленосной депрессией.
1 — угленосные отложения; 2 — палеозойские отложения

Угленосные отложения, имеющие плотность 2 г/см³ и залегающие на более плотном (2,6—2,7 г/см³) палеозойском основании, выделяются понижением поля силы тяжести (рис. 44). При картировании поверхности кристаллического палеозойского фундамента гравиразведку часто комплексировать с электроразведкой и сейсморазведкой.

Примеры применения гравиразведки при поисках месторождений железа и бокситов показаны на рис. 29, 30.

ГЛАВА IV

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА

Электрическая разведка объединяет большое число методов для изучения геологического строения земной коры путем наблюдения особенностей распространения в ней естественного или искусственно созданного электрических полей.

Естественное электромагнитное поле возникает в земной коре в результате происходящих в горных породах электрохимических процессов, за счет изменения (вариаций) земного магнитного поля, под воздействием разрядов молний и других причин.

Искусственное электромагнитное поле в Земле может создаваться и исследоваться различными способами. Существует два основных способа возбуждения электромагнитного поля в Земле: гальванический и индуктивный. Гальванический способ характеризуется тем, что два заземления, погруженные в землю, присоединяются к полюсам источника постоянного или переменного поля. При индуктивном способе источником поля является незаземленный контур, питаемый переменным током от какого-либо генератора.

Разность потенциалов между двумя заземлениями или переменное электромагнитное поле тока в незаземленном контуре и являются предметом полевых измерений. Постоянные электромагнитные поля исследуют путем измерения разности потенциалов между заземлениями, подключенными к прибору. В методах, использующих переменные электромагнитные поля, измеряют как магнитную, так и электрическую составляющие поля. Для измерения электрической составляющей, как и в методах постоянного поля, применяют заземленные измерительные линии. Для измерения магнитной составляющей обычно используют многовитковые индукционные рамки. Э. д. с., наведенную переменным магнитным полем в такой рамке, измеряют специальным прибором, подключенным к рамке.

Переменные электромагнитные поля, изменяющиеся по синусоидальному закону, характеризуются амплитудой и фазой электрической и магнитной составляющих, а также ориентацией вектора поля в пространстве.

При изучении нестационарных переменных полей измеряют мгновенные значения поля в заданный момент времени и скорость их изменения со временем.

Особенности распространения электромагнитного поля в земной коре зависят от электрических свойств разреза, размера питающей линии, частоты применяемого поля, которая может изменяться от нуля до частот, измеряемых мегагерцами (МГц). Приведем классификацию электроразведочных методов в зависимости от частоты поля.

Методы постоянного поля (частота тока равна нулю) включают:

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

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

- 1) метод вызванных потенциалов;
- 2) метод магнитотеллурического поля — магнитотеллурическое зондирование, магнитотеллурическое профилирование;
- 3) частотное электромагнитное зондирование;
- 4) зондирование становлением поля;
- 5) низкочастотные индуктивные методы;
- 6) метод переходных процессов.

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

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

В методах постоянного поля с увеличением размера питающей линии растет глубина проникновения тока, т. е. увеличивается глубинность разведки. В методах переменного поля с увеличением частоты в большой степени сказываются мелкие электрические неоднородности, однако электромагнитные волны высокой частоты быстро поглощаются горными породами, поэтому глубинность разведки уменьшается. С уменьшением частоты поля повышается глубинность электрической разведки.

Электроразведочные методы применяются в наземном, подземном (скважинном и шахтном), воздушном и морском вариантах.

Большое разнообразие электроразведочных методов, различающихся по характеру поля, способами возбуждения и измерения, позволяет применять их для решения самых различных геологических задач — поисков месторождений полезных ископаемых, геологического картирования, инженерно-геологических изысканий и т. п.

§ 37. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ИСКУССТВЕННО СОЗДАНЫМ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

1. Поле точечных заземлений

Постоянное электрическое поле на каком-либо участке земной коры создают при помощи двух заземлений A и B , которые подключают к генератору или батарее постоянного тока. Заземления представляют собой погруженные в землю на разную

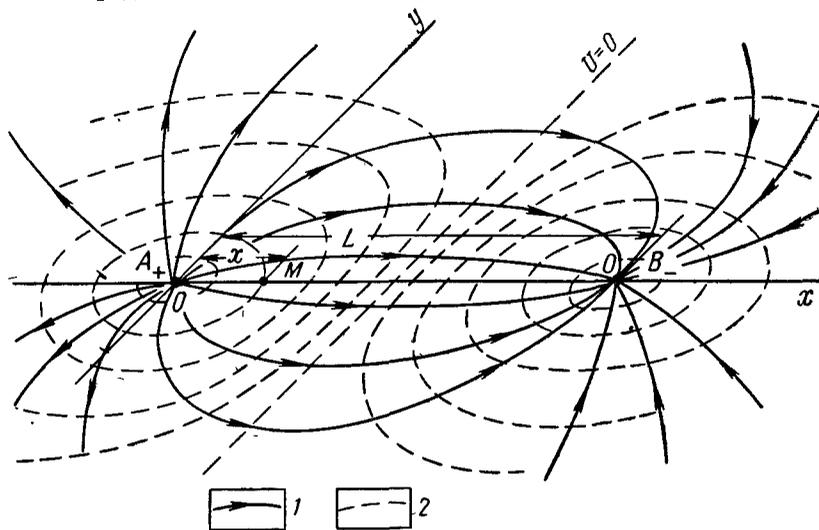


Рис. 45. Поле точечных источников A_+ и B_- в однородной среде
1 — токовые линии; 2 — эквипотенциальные линии

глубину металлические электроды различной формы. Характер электрического поля заземлений определяется удельным электрическим сопротивлением среды. Для того, чтобы судить о наличии в среде геоэлектрических неоднородностей, необходимо иметь представление о нормальном поле, которое возникает в случае однородной и изотропной сред.

При выводе формул электрического поля будем рассматривать точечные заземления A и B , которые имеют настолько малые размеры, что их форма не влияет на характер распределения поля. В электроразведке часто применяют стержневые электроды длиной 0,5—1 м. Расчеты показывают, что на расстоянии 4—5 размеров электродов поле такое же, как и от точечных электродов. Поскольку в электроразведке наблюдения поля ведут на значительно больших расстояниях, характеристика поля точечных заземлений вполне приемлема, чтобы иметь представление об особенностях поля заземлений иной формы.

Предположим, что на поверхности однородной изотропной среды удельного сопротивления ρ расположены два заземления A и B , через которые протекает электрический ток (рис. 45). Совместим линию AB с осью Ox системы координат x, y, z . Согласно принципу суперпозиции, поле в какой-либо точке M среды складывается из алгебраической суммы полей, обусловленных отдельно каждым из заземлений A и B .

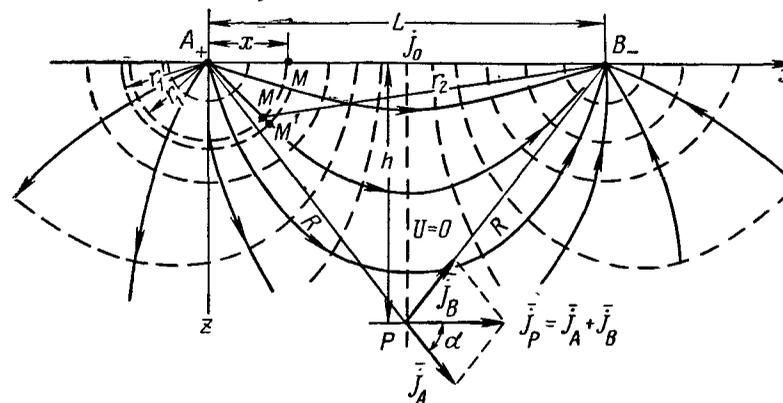


Рис. 46. Вертикальный разрез поля точечных источников A_+ и B_- в однородной среде

Рассмотрим потенциал, напряженность и плотность тока в некоторой точке M .

Потенциал U_M в точке M равен алгебраической сумме потенциалов U_M^A и U_M^B , создаваемых полями заземлений A и B : $U_M = U_M^A + U_M^B$. Для нахождения слагаемого U_M^A предположим, что заземление B находится настолько далеко, что влияние его можно пренебречь. Поскольку среда имеет постоянное удельное сопротивление, электрический ток с заземления A растекается одинаково по всем направлениям. Токовые линии имеют вид прямых лучей, исходящих из точки A (рис. 45 и 46).

Примем расстояние между точками M и A равным r_1 и опишем вокруг точки A две полусферические поверхности радиусами r_1 и r_1' таким образом, чтобы величина $\Delta r_1 = r_1' - r_1$ была ничтожно мала.

Рассмотрим приращение потенциала ΔU между точками M и M' . Если сила тока, проходящего через полусферический слой, равна I , а сопротивление его R , то, согласно закону Ома, $\Delta U = IR$.

Величина R , как известно из физики, определяется выражением

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

где $l = \Delta r_1$, а S равна среднему значению площади поперечного сечения полусферического слоя, заключенного между поверхностями с радиусами r_1 и r_1' .

Так как радиусы r_1 и r_1' отличаются на ничтожно малую величину, то можно полагать, что $S \approx 2\pi r_1^2$. Таким образом,

$$\Delta U = I\rho \frac{\Delta r_1}{2\pi r_1^2}.$$

Если величину Δr_1 считать бесконечно малой, то формулу можно записать в дифференциальной форме:

$$dU = I\rho \frac{dr_1}{2\pi r_1^2},$$

откуда напряженность электрического поля в точке M

$$E_M^A = \frac{dU}{dr_1} = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1^2} = j\rho,$$

где j — плотность тока, равная $I/2\pi r_1^2$.

Учитывая, что потенциал U_M есть работа по перемещению заряда из точки M в бесконечность, интегрируем выражение в пределах от r_1 до бесконечности, в результате чего получаем формулу потенциала поля источника тока A в точке M :

$$U_M^A = \int_{r_1}^{\infty} I\rho \frac{dr_1}{2\pi r_1^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_1}. \quad (16)$$

Если в формуле величину r_1 принять постоянной, то окажется, что потенциал U_M^A будет также постоянной величиной. Это означает, что поверхности равного потенциала поля точечного заземления в однородной среде представляют собой полусферические поверхности, перпендикулярные к токовым линиям.

Аналогично изложенному можно получить выражение потенциала U_M^B , создаваемого в точке M полем заземления B , расположенного от точки на расстоянии r_2 :

$$U_M^B = -\frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_2}.$$

Суммарный потенциал в точке M

$$U_M = U_M^A + U_M^B = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (17)$$

Из формулы (17) следует, что при $r_1 = r_2$ $U_M = 0$. Это означает, что в точках M , отстоящих на одинаковых расстояниях от заземлений A и B , потенциал U_M равен нулю. Геометрическое семейство таких точек представляет собой поверхность нулевого потенциала. Это вертикальная плоскость, параллельная плоскости yOz , пересекающей ось Ox посередине между точками A и B .

На пересечении плоскости нулевого потенциала с плоскостью yOx получим линию нулевого потенциала, перпендикулярную к AB . Придавая потенциалу U_M несколько постоянных значений и находя при каждом из них местоположение линий

$$C_i = \frac{U_M \cdot 2\pi}{I\rho} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2},$$

получим семейство поверхностей равного потенциала, а в плоскостях xOy и xOz — семейство линий равного потенциала. Картина их распределения изображена на рис. 45 и 46. При $r_1 \rightarrow 0$ и $r_2 \rightarrow \infty$, т. е. по мере приближения точки к заземлениям A или B , потенциал точки стремится к положительной или отрицательной бесконечности.

Если точку M измерения потенциала поместить на поверхность xOy , на линии Ox , между заземлениями A и B (рис. 45), то

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{L-x} \right),$$

где L — расстояние между заземлениями A и B .

Напряженность E_x электрического поля в точках линии Ox равна первой производной потенциала по расстоянию x с обратным знаком:

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

В точке $x = L/2$, т. е. посередине между заземлениями A и B , напряженность поля имеет минимальную величину:

$$E_0 = E_{L/2} = \frac{4\rho I}{\pi L^2}.$$

Расчеты показывают, что в средней части отрезка AB напряженность поля в однородной среде мало меняется с изменением x . Эта особенность позволяет, ведя измерение величины E_x в этой части, отчетливо обнаруживать неоднородности среды.

Поскольку $E_0 = j_0\rho$, следовательно,

$$j_0 = \frac{4I}{\pi L^2}.$$

Плотность тока в середине отрезка AB уменьшается обратно пропорционально квадрату длины AB .

В точке P , лежащей над серединой отрезка AB на глубине h , плотность тока (рис. 46)

$$j_P = \frac{1}{\pi h^2} \sin^2 \alpha \cos \alpha.$$

Найдем отношение плотности j_P тока на глубине к плотности тока j_0 на дневной поверхности:

$$\frac{j_P}{j_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2h}{L}\right)^2\right]^{3/2}}. \quad (18)$$

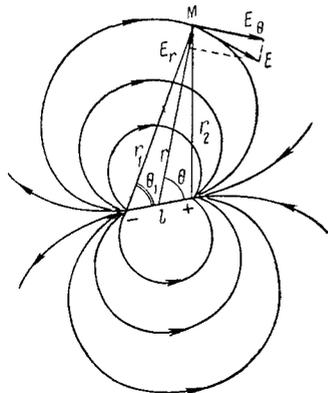


Рис. 47. Токовые линии и компоненты поля электрического диполя

Формула (18) показывает, что отношение j_P/j_0 остается постоянным в том случае, если постоянно соотношение между h и L . Это означает, что заданное относительное значение плотности тока сохранится на большей глубине в том случае, если будет увеличено расстояние между заземлениями A и B . Следовательно, увеличение размера питающей линии ведет к повышению глубинности разведки. Это утверждение оказывается справедливым для неоднородной среды, хотя закон изменения в ней плотности тока сложнее.

Если расстояние между заземлениями A и B мало по сравнению с расстоянием их от точки наблюдения M , такая совокупность источников поля называется электрическим диполем. Точечные источники диполя называются полюсами. Расстояние между ними называется длиной диполя, а прямая, проведенная через полюсы, — осью диполя.

Потенциал U_M поля диполя в точке M (рис. 47) равен сумме потенциалов, создаваемых обоими полюсами:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_1} - \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_2} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{r_1 - r_2}{r_2 r_1}.$$

Поскольку $l \ll r$ и, следовательно, $r_1 \approx r_2 \approx r$, $\theta_1 \approx \theta$, $r_1 - r_2 = l \cos \theta$, то

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

Величина $\rho I l / 2\pi = P$ называется моментом диполя. Таким образом,

$$U_M = P \cos \theta \frac{1}{r^2}.$$

Вид эквипотенциальных и токовых линий поля диполя в однородной среде показан на рис. 47. Напряженность поля диполя

в точке M представляется в виде геометрической суммы вектора E_r , радиальной составляющей, направленной по радиусу r к центру диполя, и вектора азимутальной составляющей E_θ , перпендикулярного к радиусу r . Их величины определяются как производные потенциала соответственно по радиусу r и по углу θ :

$$E_r = 2P \cos \theta \frac{1}{r^3},$$

$$E_\theta = P \sin \theta \frac{1}{r^3}.$$

Радиальная составляющая E_r имеет максимальные значения в точках, расположенных на продолжении оси диполя ($\theta = 0$), и равна $2P(1/r^3)$, а $E_\theta = 0$. Азимутальная составляющая E_θ максимальна в точках линии, проходящей перпендикулярно к центру диполя ($\theta = 90^\circ$). В этих точках $E_\theta = P(1/r^3)$, $E_r = 0$.

Таким образом, потенциал и напряженность поля дипольного источника убывают быстрее по сравнению с этими же величинами, создаваемыми точечными источниками. Поэтому при работе с дипольными установками применяют источники тока повышенной мощности.

2. Заземления, применяемые в электроразведке

В электроразведке в качестве заземлений питающей и измерительной линий широко используются металлические стержневые, дисковые, линейные, полусферические электроды. Простейшим является полусферический электрод. Предположим, что он заземлен на поверхности земли и от него в однородную среду удельного сопротивления ρ подается электрический ток. Удельное сопротивление металлического электрода настолько мало, что падением напряжения внутри него можно пренебречь. Поэтому, согласно формуле (16), потенциал поля на поверхности электрода радиусом a

$$U_a = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{a}.$$

Отношение $U_a/I = \rho/2\pi a = R_z$ рассматривается как сопротивление, которое оказывает вмещающая среда стекающему с заземления току. Величина R_z называется сопротивлением электрода.

Потенциал поля полусферического электрода в окружающей среде на расстоянии r

$$U_r = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}.$$

Он не зависит от радиуса электрода r и равен такой же величине, что и потенциал точечного электрода, заземленного на поверхности однородной среды.

Стержневые электроды толщиной $2b$ забивают в землю на глубину a . Расчеты показывают, что потенциал такого электрода при некотором удалении от него практически равен потенциалу точечного электрода. Сопротивление стержневого электрода определяется по формуле

$$R \approx \frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{2a}{b}.$$

В условиях каменистого или мерзлого грунта применяют электроды в виде опрокинутого цилиндрического сосуда с хорошо проводящим материалом (пористым веществом, пропитанным раствором соли NaCl или CuSO_4). Такие электроды можно уподобить диску. Потенциал такого электрода в окружающей среде на расстоянии, в несколько раз превышающем его диаметр, практически равен потенциалу точечного электрода и зависит лишь от расстояния между центром диска и точкой измерения. Сопротивление дискового электрода радиусом b определяется по формуле

$$R = \frac{\rho}{4b}.$$

Нередко для получения максимальных токов, не увеличивая э. д. с. источников питания, применяют 2—3 и более соединяемых в группу заземлителей. Установлено, что потенциал поля в точках, удаленных на расстояние $r > 5d$, где d — расстояние между заземлениями, с погрешностью 1% равно потенциалу точечного заземления и определяется расстоянием от центра заземлителей до точки измерения. Общее сопротивление R системы заземлений R_1, R_2, \dots, R_i рассчитывается по формуле

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}.$$

Таким образом, картина распределения электрического поля точечного заземления оказывается практически такой же и для заземлителей более сложной формы.

В некоторых методах электроразведки применяют в качестве заземлений растянутые по прямой линии провода, которые через определенные интервалы заземляются металлическими шпильками. Потенциал, создаваемый линейным электродом указанного типа в точке P , вычисляется по формуле

$$U_P = \frac{I\rho}{2\pi N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i},$$

где N — число заземляющих шпилек; r — расстояние точки P от i -го электрода группы.

Сопротивление такого электрода при наличии равенства сопротивлений шпилек можно приблизительно определить по формуле

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} + R_n,$$

где R_i — сопротивление шпильки; R_n — сопротивление провода.

3. Установки для работы методом сопротивлений

Для работы методом сопротивлений применяют специальную установку, состоящую из питающей и приемной линий. Обычно через два питающих электрода A и B пропускают электрический ток I , а между приемными электродами M и N измеряют разность потенциалов $\Delta U_{MN} = U_M - U_N$. Аналогично формуле (17) запишем

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

Следовательно,

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

Эта формула позволяет определить удельное сопротивление ρ однородной полубезграничной среды:

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

Вместо r_{AM}, r_{BM} и т. д. в электроразведке применяют обозначения соответственно AM, BM, AN и BN , поэтому

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

где

$$K = 2\pi \frac{1}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (19)$$

называют коэффициентом установки. Он зависит от взаимного расположения питающих и приемных заземлений.

Таким образом,

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}.$$

Эта формула позволяет по измерениям ΔU_{MN} и I вычислить истинное удельное сопротивление однородной среды. В реальных

геологических условиях методом сопротивлений изучают неоднородные среды, а результат измерений вычисляют по этой же формуле. Получаемая при этом величина удельного сопротивления носит название кажущегося удельного сопротивления:

$$\rho_k = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}. \quad (20)$$

Эта формула является основной формулой метода сопротивлений. В случае измерений в однородной среде кажущееся удельное

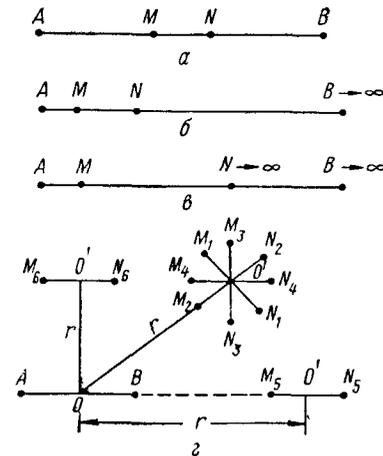


Рис. 48. Установки метода сопротивлений.

a — четырехточечная, *б* — трехточечная; *в* — двухточечная, *г* — дипольная; ABM_1N_1 — азимутальная, ABM_2N_2 — радиальная; ABM_3N_3 — перпендикулярная, ABM_4N_4 — параллельная, ABM_5N_5 — дипольно-осевая; ABM_5N_5 — дипольно-экваториальная

сопротивление ρ_k равно истинному удельному сопротивлению ρ . В неоднородных средах величину ρ_k можно рассматривать как удельное сопротивление фиктивной однородной среды, в которой получено такое же отношение $\Delta U/I$ как и при измерениях с данной установкой в неоднородной среде.

Величина ρ_k зависит от размеров, глубины залегания и удельного сопротивления геологических неоднородностей, находящихся в поле питающих заземлений. Она будет близка к истинному удельному сопротивлению ρ вмещающей среды, если глубина до неоднородности значительно превышает размер установки, поскольку в этом случае ток протекает в основном во вмещающей однородной среде. Кажущееся сопротивление будет тем ближе к величине истинного удельного сопротивления ρ неоднородности, чем меньше ее глубина залегания и больше размеры. Таким образом, величина ρ_k зависит от особенностей геоэлектрического разреза, что послужило возможностью применения метода сопротивлений для геологических исследований.

В методе сопротивлений применяют четырех-, трех- и двухточечные установки, в которых приемные заземления расположены в интервале между питающими заземлениями (рис 48),

а также установки, в которых питающая и приемная линии разнесены на расстояние, превышающее их размеры. Последние получили название дипольных установок.

Наибольшее применение имеет симметричная четырехточечная установка $AMNB$ (рис. 48, *a*), в которой $AM = NB$ и все электроды заземлены на одной прямой линии (установка Шлюмбергера). В этой установке $MN \leq 1/3 AB$, т. е. измерения ведутся в той части установки, где поле однородно. Это позволяет четко выделить геоэлектрические неоднородности разреза. В частном случае, когда $AM = MN = NB$, установка носит название установки Веннера.

Коэффициент четырехточечной установки определяется на основании формулы (19). Поскольку в ней $AM = BN$ и $BM = AN$, то

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} = \pi \frac{BM \cdot BN}{MN}.$$

Для установки Веннера $AM = MN = BN = a$. Следовательно,

$$K = 2\pi a.$$

Трехточечная установка характеризуется тем, что один из питающих электродов B удален на очень большое расстояние (в бесконечность) от остальных электродов, поэтому создаваемая им разность потенциалов ΔU_{MN}^B ничтожно мала по сравнению с разностью потенциалов ΔU_{MN}^A , создаваемой заземлением A (рис. 48, *б*).

Для установки, где электроды расположены на одной прямой линии, это условие выполняется в том случае, если $AO \leq (10 \div 15) BO$, где O — середина между заземлениями M и N . Обычно заземление B относят по перпендикуляру к отрезку MN , проходящему через его середину. В этом случае длина BO может быть значительно меньше, поскольку вследствие симметрии потенциалы U_M^B и U_N^B точек M и N относительно заземления B будут одинаковы.

Для трехэлектродной установки можно принять $1/BM \approx 1/BN \approx 0$, поэтому

$$K = 2\pi \frac{AM \cdot AN}{MN}.$$

Двухточечная установка отличается от трехточечной тем, что в ней одно из приемных заземлений N отнесено на весьма большое расстояние (в бесконечность) от заземлений A , M и B , когда потенциал U_N^A точки N ничтожно мал по сравнению с потенциалом U_M^A точки M . В этом случае величина ΔU_{MN} будет фактически характеризовать потенциал U_M^A заземления M , создаваемого полем заземления A . Поскольку в формуле (20) можно принять $1/BM \approx 1/BN \approx 1/AN = 0$, следовательно,

$$K = 2\pi AM.$$

Для дипольной установки характерным является то, что расстояние r между центрами диполей превышает в несколько раз их размеры. В зависимости от взаимного расположения диполей различают следующие основные модификации установок (рис. 48, з): а) азимутальную, в которой ось измерительной установки расположена на касательной к окружности, проведенной из точки O радиусом r ; б) радиальную, в которой ось MN направлена по радиусу r ; в) перпендикулярную, в которой оси диполей взаимно перпендикулярны; г) параллельную, если оси диполей параллельны между собой.

В частных случаях, когда оси диполей находятся на одной линии, установка называется дипольно-осевой, а если оси диполей параллельны и центры расположены на одном перпендикуляре, то установка называется дипольно-экваториальной. Коэффициенты дипольных установок вычисляются по формуле (19).

§ 38. АППАРАТУРА МЕТОДА СОПРОТИВЛЕНИЙ

1. Принцип устройства аппаратуры на постоянном токе

Для измерения разности потенциалов и постоянного электрического тока применяются компенсационный и осциллографический способы. В компенсационном способе измеряемая разность потенциалов ΔU_{MN} сравнивается с эталонной (компенсирующей) разностью потенциалов ΔU_k , источником которой является элемент $KЭ$ с делителем напряжения R (рис. 49, а). Необходимый ток компенсации I_k устанавливают с помощью переключателя Π , который вводит в цепь сопротивления (r_1, r_2 и r_3) той или иной величины. Передвигая ползунок O по реостату R , добиваются нулевого показания индикатора нуля $ИН$, при котором компенсационная разность потенциалов равна измеряемой и рассчитывается как произведение:

$$\Delta U_k = \Delta U_{MN} = I_k R_k.$$

В этом способе на результаты измерений не влияют ошибки нелинейности шкалы измерительных приборов, поскольку индикатор нуля $ИН$ работает в режиме нулевых показаний. Вследствие малых величин токов недокомпенсации чувствительность индикатора нуля весьма высокая, благодаря чему имеется возможность измерять очень малые величины (десятые доли милливольт) разности потенциалов с относительной погрешностью 1,5—2,5%.

Компенсационный способ измерений был реализован в одном из первых электроразведочных приборов — потенциометре ЭП-1. В современных приборах применяется автоматическая компенсация (рис. 49, б) измеряемой величины. В электронном автоком-

пенсаторе измеряемая разность потенциалов подается последовательно на сопротивление R_y входа усилителя $У$ и сопротивление R_k . Разность потенциалов ΔU_1 , снимаемая с сопротивления R_y , усиливается до величины ΔU_2 . Под действием последней электрический ток I_k на сопротивлении R_k создает компенсирующую разность потенциалов ΔU_k . Она имеет противоположный знак по отношению к измеряемой разности потенциалов ΔU_{MN} . Величина ΔU_k автоматически устанавливается приблизительно равной ΔU_{MN} , поскольку заметная разница между ними сразу же ведет к возникновению на входе усилителя некоторой величины ΔU_1 . Внутреннее сопротивление микроамперметра $мА$ мало по сравнению с величиной R_k , а коэффициент усиления усилителя достаточно велик (10^4), поэтому величина тока I_k практически пропорциональна ΔU_k , т. е. измеряемой разности потенциалов:

$$I_k = \frac{\Delta U_{MN}}{R_k}.$$

В этой формуле коэффициентом пропорциональности является величина R_k . Имеется возможность путем ее изменения регулировать чувствительность автокомпенсатора.

В осциллографическом способе в качестве измерительного прибора применяется зеркальный гальванометр, подключенный к приемной линии MN . Принцип действия зеркального гальванометра изображен на рис. 49, в. Разность

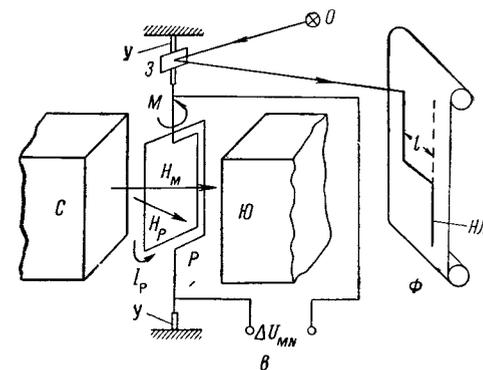
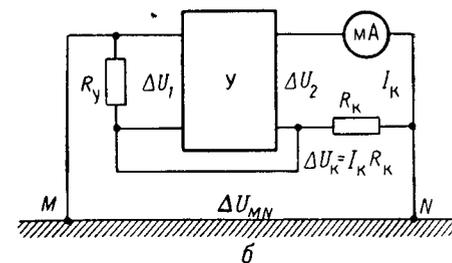
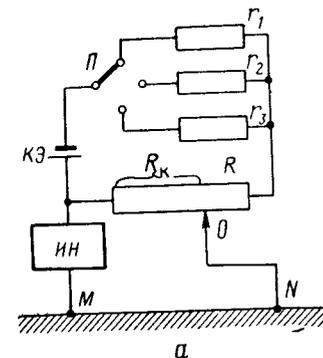


Рис. 49. Принципиальная схема компенсационного (а), автокомпенсационного (б) и осциллографического (в) способов измерения разности потенциалов

потенциалов ΔU_{MN} подводится к рамке P , помещенной в зазоре между полюсами магнита. За счет ΔU_{MN} в рамке протекает электрический ток I_p , который индуцирует магнитное поле H_p . Под действием магнитного поля H_m магнита в рамке создается момент M , который стремится повернуть ее до совпадения направлений полей H_m и H_p . Действие момента M уравновешивается упругими силами растяжек U . Угол поворота рамки пропорционален току I_p и, следовательно, ΔU_{MN} . Луч света от осветителя O падает на зеркальце Z , установленное на одной из растяжек, и отражается от него на движущуюся фотобумагу Φ . Отклонение l луча на фотобумаге от нулевой линии HL записи (когда ток в рамке отсутствует) пропорционально углу поворота зеркальца и, следовательно, величине ΔU_{MN} . Зная постоянную по напряжению m (чувствительность) отклоняющего устройства (в мВ/см), величину ΔU_{MN} можно вычислить по формуле

$$\Delta U_{MN} = lm.$$

Постоянная по напряжению m зависит от сопротивления нагрузки, которое складывается из сопротивления соединительных проводов, сопротивления заземлений и внутреннего сопротивления рамки гальванометра. Сопротивление заземлений зависит от конфигурации электродов, их размеров и сопротивления среды, в которую помещены электроды. Таким образом, постоянная по напряжению гальванометра меняется при перемещении электроразведочной установки и определяется для каждого ее положения. С этой целью при выключенном токе в цепи AB в измерительную схему подают градуировочную разность потенциалов ΔU_r и записывают отклонение l_r регистрирующего устройства. Полученные данные позволяют вычислить постоянную m_r для конкретных условий измерения:

$$m_r = \frac{\Delta U_r}{l_r}. \quad (21)$$

Затем в питающей линии включают ток и записывают отклонение блика l , пропорциональное ΔU_{MN} , которое вычисляют по формуле

$$\Delta U_{MN} = lm_r = l(\Delta U_r/l_r). \quad (22)$$

Этот способ применяется в электроразведочных станциях с осциллографической записью.

Принципиальная схема установки метода сопротивлений показана на рис. 50. Она позволяет пропускать через питающие электроды A и B ток некоторой величины I_{AB} , измерять его, а между приемными электродами M и N измерять разность потенциалов ΔU_{MN} . В схеме токовой цепи установлены источник постоянного тока $ИТ$ (батарея, аккумулятор или генератор), эталонное сопротивление R_0 и выключатель K . В схеме измерительной цепи установлены переключатель $П$ рода работ, измери-

тельный прибор $ИП$ и компенсатор поляризации $КП$. Он состоит из компенсационного элемента $КЭ$, переменных сопротивлений R_r со ступенчатым изменением и R с плавным изменением их величин. С их помощью имеется возможность регулировать грубо и плавно величину подаваемой в измерительную цепь разности потенциалов. Компенсатор поляризации служит для компенсации полей-помех, возникающих в методах сопротивлений на постоянном токе. Поля-помехи складываются из поляризации электродов, естественного электрического поля и блуждающих токов, связанных с утечками тока из промышленных электрических установок, линий электропередач, рельсов, электрифицированных железных дорог и других постоянных или плавно меняющихся помех.

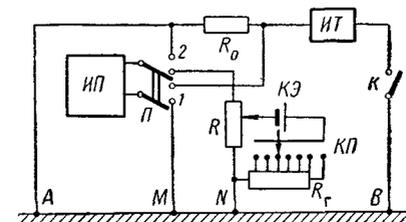


Рис. 50. Принципиальная схема установки метода сопротивлений

В позиции 1 переключателя $П$ при выключенном токе питающей цепи компенсируют разность потенциалов полей-помех. Компенсация заключается в установке с помощью компенсатора поляризации нулевого показания измерительного прибора $ИП$. Затем замыкают с помощью ключа K схему питающей цепи и компенсационным методом измеряют разность потенциалов ΔU_{MN} . Далее переключатель $П$ переводят в позицию 2, вследствие чего измерительный прибор оказывается подключенным к эталонному сопротивлению R_0 в токовой цепи. Падение напряжения ΔU_{R_0} на нем пропорционально величине тока I_{AB} :

$$\Delta U_{R_0} = I_{AB} R_0,$$

следовательно,

$$I_{AB} = \frac{\Delta U_{R_0}}{R_0}.$$

Таким образом, измерив ΔU_{R_0} , по формуле определяют силу тока в питающей линии. Далее вычисляют ρ_k по формуле (20).

2. Электроразведочные стрелочные компенсаторы

Электроразведочные стрелочные компенсаторы типа ЭСК являются легкими (массой 8 кг) переносными приборами, предназначенными для измерения разности потенциалов и силы тока при работе с установками длиной AB до 2—4 км. Принципиальная схема электронного стрелочного автокомпенсатора ЭСК-1 изображена на рис. 51.

При позиции 1 переключателя Π измеряемая разность потенциалов ΔU_{MN} поступает на вход компенсатора, вследствие чего в контуре I протекает электрический ток I_1 , создающий на сопротивлении R_k падение напряжения ΔU_1 . В свободном положении якоря 3 вибропреобразователя $ВП$ через сопротивление R_y в контуре I протекает электрический ток I_1 . При замыкании контактов 3 и 1 сопротивление R_y закорачивается и ток в цепи не проходит. Таким образом, на сопротивлении R_y создается пульсирующая разность потенциалов, которая усиливается в усилителе $У$, выпрямляется с помощью контактов 3 и 2 вибропреобразователя и в контуре II создает постоянный электрический ток I_2 . Его направление противоположно току I_1 контура I , поэтому на сопротивлении R_k возникает компенсирующая разность потенциалов ΔU_k , противоположная по знаку разности потенциалов ΔU_1 . Если какая-то часть величины ΔU_1 будет некомпенсирована, то в контуре I будет протекать ток и образующееся при этом падение напряжения на сопротивлении R_y будет снова усилено, благодаря чему в контуре II возникнет дополнительная часть тока, которая на сопротивлении R_k создаст добавочную компенсирующую разность потенциалов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока величины ΔU_k и ΔU_1 не сравняются. Практически это происходит мгновенно. Величина полного компенсационного тока I_2 измеряется миллиамперметром $СИ$. Она пропорциональна

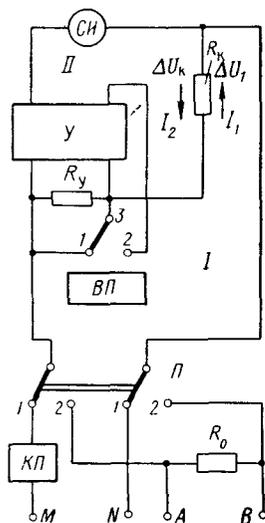


Рис. 51. Принципиальная схема электроразведочного стрелочного автокомпенсатора ЭСК-1

ΔU_1 и, следовательно, измеряемой разности потенциалов ΔU_{MN} . В измерительной цепи прибора перед входом установлен компенсатор поляризации $КП$, с помощью которого можно компенсировать разность потенциалов грубо в пределах ± 500 мВ, менее грубо в пределах ± 30 мВ и точно в пределах ± 3 мВ.

В позиции 2 переключателя Π измеряется сила тока в цепи AB , которая пропорциональна падению напряжения на эталонном сопротивлении R_0 . В позициях 1 и 2 переключателя Π шкала стрелочного индикатора $СИ$ проградуирована соответственно в милливольтгах и миллиамперах. Схема прибора предусматривает использование стрелочного прибора для контроля источников питания.

Прибор смонтирован в металлическом корпусе, который устанавливают во время работы на треноге. В корпусе помещены также источники питания.

Автокомпенсатор ЭСК-1 позволяет измерять разность потенциалов от 1 до 1000 мВ и силу тока от 1 до 300 мА.

В электроразведочном автокомпенсаторе АТ-72 механический прерыватель (вибропреобразователь) заменен транзисторным интегральным переключателем, а вместо усилителя на электронных лампах применен усилитель на транзисторах. Благодаря применению транзисторов, масса прибора уменьшилась до 4 кг. Пределы измерения электрического напряжения расширены от 0,3 до 1000 мВ, а силы тока — от 3 до 3000 мА. Повысилась экономичность и надежность работы прибора по сравнению с автокомпенсатором ЭСК-1.

3. Электроразведочные станции

Для изучения электроразведочными методами больших глубин применяются установки с длиной питающих линий 15—20 км. Они состоят из генераторной группы и измерительной лаборатории, каждая из которых устанавливается на специальной автомашине. Регистрация слабых сигналов ведется в лаборатории на фотобумаге с помощью зеркального гальванометра. На точке наблюдений записывается серия измеряемых сигналов, что позволяет надежно выделять их на фоне помех.

Современные станции ЭРС могут быть использованы для работы не только методами сопротивлений, но и для регистрации низкочастотных составляющих магнитотеллурического поля Земли и исследования медленно меняющегося нестационарного поля. Широко применяемая на производстве универсальная электроразведочная станция ЭРСУ-61 состоит из генераторной группы ЭРТГ-60 и измерительной лаборатории ЭПЛ-61.

Генераторная группа ЭРТГ-60 состоит из двух генераторов, пульта управления, осциллографа ЭПО-5, телеключателя ТВ-6, радиостанции РС, телефона и комплекта батарей 69-ГРМЦ-6.

Два генератора ПН-100 спарены на общем валу и приводятся во вращение от коробки отбора мощности автомашины. Последовательное их соединение позволяет получить напряжение 920 В при токе 25 А. При параллельном соединении напряжение равно 460 В, а сила тока 50 А. С помощью специальной системы контактов (быстродействующих рубильников с искрогасящей системой и дистанционным управлением) ток в линию AB можно посылать в виде длительных импульсов прямоугольной формы одинаковой или разной полярности. Первый режим работы называют обычным, второй — режимом удвоения. Обычный режим создается путем поочередного подключения генераторов к линии AB и к балластному сопротивлению, величина которого близка к сопротивлению питающей линии. Режим удвоения создается путем ритмичного изменения полярности подключения генераторов в линию AB .

Измерительные приборы на пульте управления дают возможность контролировать напряжение и ток каждого генератора,

а также общий ток и напряжение в цепи питающих электродов. Регулировка напряжения осуществляется реостатами в цепи возбуждения генераторов и за счет изменения числа оборотов двигателя автомашины.

Величина тока в питающей линии регистрируется на фотобумаге зеркальным гальванометром осциллографа ЭПО-5 путем подключения его к эталонному сопротивлению R_0 питающей линии.

При необходимости два канала осциллографа могут регистрировать разность потенциалов в измерительных линиях электроразведочных установок. Таким образом, генераторная группа может быть использована как самостоятельный комплект аппаратуры для работы методами на постоянном токе.

Телевключатель ТВ-6 применяется для синхронного дистанционного включения осциллографов генераторной группы и измерительной лаборатории при работе методами теллурического поля. Он работает совместно с радиостанцией РС. В режиме передачи он моделирует несущую частоту станции импульсами длительностью 0,3 с и частотой 400 Гц. В режиме приема телевключатель детектирует принятый радиостанцией сигнал и обеспечивает питание маркировочного канала осциллографа синхронизированными импульсами постоянного напряжения. Радиостанция и телефон позволяют осуществлять связь между операторами генераторной группы и лаборатории, а также между операторами и рабочими на заземлениях. При небольших размерах (2—5 км) установок питание линии АВ может осуществляться от нескольких сухих батарей, а измерение разности потенциалов прибором ЭСК.

Измерительная лаборатория ЭПЛ-61 состоит из входной панели, панели управления, усилителей постоянного напряжения ЭЛУ-61, осциллографа ЭПО-7 с измерительной панелью ИПО, низковольтной панели, телевключателя и радиостанции.

Провода от измерительных электродов через входную панель и коммутирующее устройство панели управления подключаются прямо или через усилитель ЭЛУ-61 (если сигналы слабые) к измерительной панели осциллографа.

Импульсный характер сигналов позволяет выделить их на фоне плавно меняющейся разности потенциалов поляризации электродов и естественного электрического поля. Работа в режиме удвоения дает возможность получить импульсы удвоенной амплитуды, т. е. более уверенно выделить слабые измеряемые сигналы. На фотоленту автоматически через каждые 10 с наносятся марки времени МВ с помощью специального гальванометра, напряжение на который подается с помощью специального секундомера. Марки времени помогают выбрать и поддерживать наиболее оптимальную длительность импульсов тока и соответственно измеряемых сигналов, при которой полезные сигналы выделяются наиболее эффективно на фоне помех. Марки

времени служат для непосредственного отсчета времени при работе по методу теллурических токов.

При работе с некоторыми установками удобно включать ток в питающую линию из измерительной лаборатории. С этой целью на панель управления вынесен выключатель, при помощи которого включается питание электромагнитных реле, коммутирующих ток в питающей линии. Низковольтная панель измерительной лаборатории позволяет контролировать напряжение и расход тока аккумуляторов, предназначенных для питания электрических цепей станции.

Синхронизация марок времени и связь между лабораторией и генераторной группой осуществляются посредством телевключателя ТВ-6 и радиостанции.

В комплект электроразведочной станции, кроме перечисленных блоков, входят фотолaborатория, катушка с проводами, электроды и другое вспомогательное оборудование.

4. Морская электроразведочная аппаратура

Морские электроразведочные станции сконструированы на базе станций метода сопротивления и состоят из генераторной и измерительной установок, смонтированных на двух судах. Генераторы тока приводятся в движение от судовых двигателей. Станции обеспечивают непрерывную регистрацию измеряемых величин в процессе движения кораблей.

Для исследования больших глубин с установками больших размеров применяется электроразведочная станция ЭРСМ-57. Ее генераторная и измерительная установки смонтированы на двух судах водоизмещением 100—150 т. Генераторная установка позволяет получить разнополярные импульсы тока величиной 40—50 А при напряжении 450 В. Для этой цели служат два генератора ПН-145, включенные параллельно. В случае необходимости генераторы могут быть отключены с помощью специальных кнопок, установленных в служебных помещениях судна. Величина тока измеряется с помощью осциллографа и контролируется визуально по амперметру панели управления. Продолжительность импульсов тока может регулироваться от 3 до 45 с. Импульсы тока могут подаваться поочередно в шесть питающих линий. Подключение той или иной питающей линии к генератору и изменение полярности тока осуществляется с помощью специальных контакторов и инверсионного реле, катушки которых питаются от генератора напряжением 220 В. Преобразователь ПО-550, подключенный к генератору, вырабатывает переменное напряжение 127 В для питания устройства при радиогодезической привязке точек наблюдений.

В измерительной установке для записи разности потенциалов установлены осциллографы со специально сбалансированными гальванометрами, на которые мало влияет качка судна, а также

имеется малая генераторная установка. Она предназначена для измерения величины ρ_k при неподвижном положении судна и небольших размерах питающих линий. На судах имеются лебедки для размотки кабеля с приводом от генераторов ПН-45. Кроме того, имеются радиостанции для связи между кораблями и телевыключатели для маркировки осциллограмм.

Для определения расстояния между движущимися судами применяется специальный радиодальномер, который состоит из задающей и отражающей станций, установленных на разных судах. На задающей станции формируется опорный сигнал, фаза которого сравнивается с фазой отраженного сигнала. Разность этих фаз пропорциональна расстоянию между судами. Погрешность измерения расстояний составляет 5 м.

5. Аппаратура для работы на переменном токе низкой частоты

В теории электромагнитных полей установлено, что созданное в земле с помощью двух электродов переменное электромагнитное поле низкой частоты (первые десятки герц) при малых размерах установок не отличается от поля постоянного тока. Это послужило основанием для создания электроразведочной аппаратуры метода сопротивлений работающей на частоте 22,5 Гц. С помощью фильтров низкой частоты, установленных в измерительной цепи, значительно ослабляются промышленные и другие помехи более высоких частот, а также постоянные и плавно меняющиеся помехи. Это позволяет измерять слабые полезные сигналы, и как следствие снижать мощность источников тока в цепи питающих заземлений. В низкочастотной аппаратуре нет необходимости иметь компенсатор поляризации, что увеличивает производительность труда.

Однако следует отметить, что при работе с аппаратурой на переменном токе расстояние между питающими и измерительными заземлениями не должно превышать 0,5—1 км, в противном случае различие между постоянным и переменным полями становится недопустимо большим и в измерительной линии начинают сказываться индуктивные помехи, обусловленные переменным током питания линии AB .

Для работы на переменном токе низкой частоты применяется измеритель кажущегося сопротивления ИКС. Его упрощенная схема приведена на рис. 52. Основными ее элементами являются генератор питающей линии, микровольтметр и градуировочное устройство.

Ток в линии AB подается от транзисторного генератора питающей линии $ГПЛ$, который преобразует постоянное напряжение батарей или бензоагрегата в переменное в виде прямоугольных импульсов с частотой 22,5 Гц. Сила тока I_{AB} стабилизирована таким образом, что в зависимости от сопротивления питающей

линии отклоняется от номинального значения не более чем на 1%. Измеряемая разность потенциалов при установке переключателя $П$ в положение 2 через калиброванный ступенчатый делитель напряжения $СДН$ подается на усилитель $У$ с узкой полосой пропускания, к выходу которого подключен стрелочный индикатор $И$. С помощью делителя $СДН$ устанавливают некоторый коэффициент деления α , при котором стрелка индикатора $И$ установилась бы в середине или на второй половине шкалы.

Далее переключатель $П$ переводят в положение 1, при котором на усилитель подается опорный сигнал с генератора опорных сигналов $ГОС$ через переключатель ступенчатого $П_\beta$ и плавного $П_\gamma$ изменения сопротивления. Выходной ток генератора стабилизирован и равен величине $I_{ГОС}$.

С помощью переключателей $П_\beta$ и $П_\gamma$ величину опорного сигнала выбирают таким образом, чтобы стрелочный индикатор $И$ установился в таком же положении, что и при измерении ΔU_{MN} . Поскольку показание индикатора при измерении ΔU_{MN} равно $k_y \cdot (\Delta U_{MN}/\alpha)$, а при измерении опорного сигнала — $k_y (\beta + \gamma) I_{ГОС}$, где k_y — коэффициент усилителя, то

$$k_y (\beta + \gamma) I_{ГОС} = k_y \frac{\Delta U_{MN}}{\alpha},$$

или

$$\Delta U_{MN} = \alpha (\beta + \gamma) I_{ГОС}.$$

Величина кажущегося сопротивления определяется по формуле

$$\rho_k = K \frac{\alpha (\beta + \gamma) I_{ГОС}}{I_{AB}}.$$

Поскольку для применяемого комплекта аппаратуры установки величина $K (I_{ГОС}/I_{AB}) = K_1$, то

$$\rho_k = K_1 \alpha (\beta + \gamma).$$

Таким образом, величина кажущегося сопротивления ρ_k определяется путем умножения k_1 на коэффициент α делителя и сумму сопротивлений $(\beta + \gamma)$.

В зависимости от типа и размеров электроразведочных установок применяются генераторы мощностью 1 Вт (ИКС-1), 50 Вт (ИКС-50) и 600 Вт (ИКС-600). Обычно в комплект аппаратуры входит несколько микровольтметров, что позволяет измерять разность потенциалов одновременно в нескольких измерительных линиях.

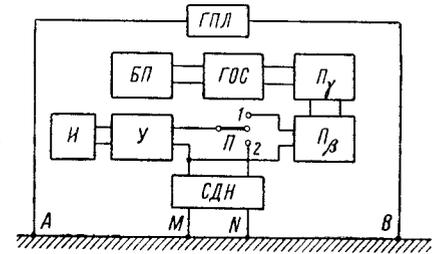


Рис. 52. Принципиальная схема измерителя кажущегося сопротивления

Пределы измерения разности потенциалов с аппаратурой ИКС составляют от 3 мкВ до 1000 мВ с относительной погрешностью 3%.

6. Источники питания, провода и электроразведочное оборудование

В качестве источников питания различных цепей в электроразведке применяют батареи сухих элементов Лекланше, генераторы переменного и постоянного тока, аккумуляторы. Для питания анодных цепей аппаратуры используют батареи типа АМЦГ или ПМЦГ (анодная или приборная марганцевая, цинковая, галетная), имеющие емкость от 0,25 до 2 А·ч, напряжение 13; 48; 87; 100 и 102 В. Батареи имеют бумажную упаковку и небольшую массу (от 0,25 до 3,3 кг). Начальное напряжение обозначается первыми цифрами, а емкость — последними цифрами, стоящими в названии батарей. Для питания токовых цепей установок небольших размеров применяют геологоразведочные марганцевоцинковые батареи типа 69-ГРМЦ-6 и 29-ГРМЦ-13 массой до 20—26 кг, упакованные в деревянные ящики.

Батареи 69-ГРМЦ-6 состоят из двух секций по 24 элемента в каждой. Концы секций выведены на боковую стенку корпуса. При последовательном соединении батарея дает напряжение 69 В, а ток 0,5 А, при параллельном соединении напряжение и ток равны соответственно 34,5 В и 1 А. Батарея 29-ГРМЦ-13 состоит из двух секций по 10 элементов. Концы секций имеют панель, аналогичную панели для батареи 69-ГРМЦ-6. При параллельном подключении секций батарея дает напряжение 14,5 В и ток 2 А, при последовательном — напряжение удваивается, а ток уменьшается в два раза. Для подачи тока в питающие линии длиной до 1000 м на высокоомных разрезах применяются легкие (3,3 кг) батареи типов 102-АМЦ-У-1,0 и 102-АМЦ-Х-1,0. Накальные цепи и компенсаторы поляризации во многих типах аппаратуры питаются от элементов типа ТМЦ (телефонный марганцево-цинковый), ПМЦ (приборный) и ФМЦ (фонарный) напряжением от 1,48 до 3,76 В и емкостью от 0,5 до 9 А·ч. Для питания вспомогательных цепей электроразведочных станций используются щелочные и кислотные аккумуляторы. Для получения токов больших величин применяют генераторы ПН-68, ПН-100 и ПН-145 с номинальным напряжением 460 В и мощностью соответственно 4,8; 11,5 и 16,5 кВт.

Для монтажа установок применяются в основном специальные геофизические провода ГПМП, ГПСМП и ГПСМПО, а в установках длиной АВ до 500—1000 м — легкие провода полевой связи с хлорвиниловой изоляцией. Провода ГПМП (геофизический провод медный в полиэтиленовой изоляции) и ГПСМП (сталемедный) имеют наружный диаметр соответственно 5,6 и 4,6 мм и применяются для питания линий размером до 8—10 км. Провод

ГПСМПО (облегченный) имеет диаметр 3,25 мм и применяется в установках длиной до 2 км.

В качестве заземлений, питающих линии, служат железные стержневые электроды диаметром 1,5—2 см и длиной 0,5—1 м. Приемные линии заземляются стержневыми или трубчатыми (с дубовым сердечником) медными и латунными электродами диаметром около 20 мм и длиной 0,4—0,5 м. Применение в линиях МN медных электродов вызвано необходимостью уменьшить их э. д. с. поляризации. Для хранения, транспортировки и размотки проводов широко распространены катушки на специальных подставках с рукоятками, вмещающие до 500 м провода ГПСМ. Катушки имеют изолированные панели для подключения стандартных электрических вилок. Для забивки электродов питающих линий применяют железные кувалды массой 3—5 кг, для забивки медных электродов — окантованные железными обручами деревянные молотки, изготовленные из твердых пород дерева. В качестве изоляционного материала применяют изоленту.

На электроразведочных станциях провод наматывается на специальные лебедки, которые входят в комплект аппаратуры станции. Лебедки приводятся в движение от коробки отбора мощности. На морских станциях лебедки имеют привод от электродвигателя ПН-45 напряжением 220 В и мощностью 6 кВт. Питающие и приемные линии морских станций монтируются из специальных кабелей, а лебедки снабжены автоматическим кабелеукладчиком.

Для подготовки и снятия питающих линий при работе методом сопротивлений и другими методами с большими разносами применяются специальные электроразведочные агрегаты. Электроразведочный агрегат ЭРА смонтирован на автомобиле высокой проходимости ЗИЛ-131. Он вдавливают и извлекают электроды с помощью гидроцилиндра, на штоке которого установлен гидромеханический патрон. Электроды собираются из штанг, наращиваемых в процессе вдавливания до необходимой глубины. Провода разматываются и сматываются при помощи смоточных станков. Съёмные катушки позволяют создавать питающие линии в одну или две нити. При сматывании проводов механически осуществляется их равномерная укладка на катушках.

В комплекты электроразведочной аппаратуры входит необходимое количество запасных частей и инструмента. Транспортируется аппаратура в специальных ящиках в легкой упаковке. Электроразведочные станции снабжены тестерами, мегомметрами и другими контрольно-измерительными приборами.

§ 39. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ

Электрическое профилирование — это метод изучения кажущегося сопротивления пород путем последовательного перемещения установки по профилю при неизменных разносах, что

позволяет обеспечивать постоянной глубину исследования и обнаруживать появление в разрезе геологических неоднородностей, отличающихся по сопротивлению от окружающих пород.

При электропрофилеировании применяются установки $AMNB$, $AA'MNB'B$, $AA'A'MN'B'B$ и других типов. Наиболее широкое применение нашли установки первых двух типов.

Симметричная установка $AMNB$ применяется для изучения сравнительно простых геологических разрезов. Возможности этой установки рассмотрим на примере изучения вертикального

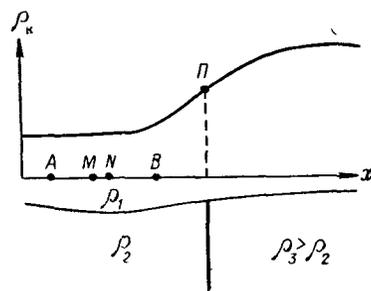


Рис. 53. График электропрофилеирования установкой $AMNB$ над контактом под перекрывающим слоем пород

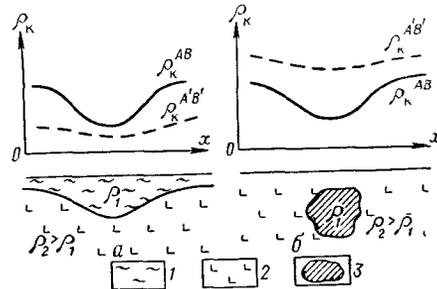


Рис. 54. Графики электропрофилеирования симметричной установкой с двумя разносами над наносами (а) и рудной залежью (б).

1 — наносы; 2 — эффузивы; 3 — рудная залежь

контакта (рис. 53), находящегося под небольшим слоем горных пород с удельным сопротивлением ρ_1 и мощностью h .

Часть тока распространяется по верхнему слою образований, а некоторая часть устремляется в нижнюю среду с сопротивлениями ρ_2 и ρ_3 . Когда установка находится над средой с сопротивлением ρ_3 , то в верхний слой устремляется значительно большая часть тока по сравнению с тем случаем, когда установка была над средой ρ_2 . Поэтому разность потенциалов между электродами MN становится большей, следовательно, возрастает и кажущееся сопротивление ρ_k . Над контактом будет находиться точка перегиба Π графика. Величина перепада кажущегося сопротивления будет тем больше, чем больше будет разница между величинами ρ_2 и ρ_3 ; чем меньше будет разница между ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 ; и, наконец, чем больше будет размер установки по отношению к мощности верхнего слоя. Наилучшие условия выявления неоднородностей создаются в том случае, когда верхний слой мощностью h отсутствует или его удельное сопротивление близко по удельному сопротивлению к нижележащим неоднородностям.

Над локальными неоднородностями низкого сопротивления (меньшего ρ_1) будет происходить уменьшение плотности тока.

поэтому они выделяются минимумом ρ_k . Над объектами высокого сопротивления (большого ρ_1) будет наблюдаться увеличение плотности тока и, следовательно, увеличение разности потенциалов, т. е. максимум на кривой ρ_k . Расстояние между заземлениями M и N выбирают в пределах $(1/3 \div 1/9) AB$. Верхний предел MN обусловлен тем, что при его увеличении на результаты измерений сказывается влияние электродов AB , а уменьшение нижнего предела приводит к резкому уменьшению измеряемых разностей потенциалов ΔU_{MN} . Некоторое уменьшение предела возможно в случае применения аппаратуры низкой частоты с высокой помехоустойчивостью. С увеличением величины MN влияние мелких неоднородностей сглаживается, поэтому в отмеченных пределах величина MN регулируется с таким расчетом, чтобы график ρ_k был наиболее дифференцирован. Размер MN выбирают равным или кратным шагу установки.

Симметричная установка $AA'MNB'B$ с двумя разносами отличается от установки $AMNB$ наличием дополнительной пары заземлений $A'B'$, расположенных также симметрично относительно центра O , но разнос линии $A'B'$ меньше разноса AB . На точках наблюдений одно значение $\rho_k^{A'B'}$ измеряют с линией $A'B'$, а второе значение ρ_k^{AB} — с линией AB .

Полученные графики характеризуют геоэлектрический разрез на разных глубинах, потому что с изменением разноса питающей линии меняется глубина проникновения тока. Это позволяет расширить возможности электропрофилеирования и в ряде случаев устранить неоднозначность истолкования его результатов. Так, по графикам ρ_k^{AB} невозможно определить геологическую природу проводящего аномального объекта (рис. 54, а). В то же время график $\rho_k^{A'B'}$ располагается ниже графика ρ_k^{AB} . Это означает, что проводящая зона выходит на поверхность земли и обусловлена в данном случае участком резкого увеличения мощности наносов. График $\rho_k^{A'B'}$ малого разноса располагается выше графика большого разноса. Это означает, что проводящий объект перекрыт сверху горными породами более высокого удельного сопротивления и вызван в данном случае рудной залежью.

Установка с двумя разносами применяется для картирования крутопадающих объектов в условиях неоднородных по мощности и удельному сопротивлению покровных отложений. По графикам $\rho_k^{A'B'}$ можно выделить аномалии, связанные с неоднородностью наносов, а также аномалии, обусловленные неоднородностью фундамента.

Установка с тремя разносами $AA'A'MNB'B$ позволяет изучать геоэлектрический разрез на трех глубинах и еще в большей степени повысить геологическую информативность метода.

Симметричные установки оказываются мало эффективными при выявлении крутопадающих маломощных жил. Это происходит

потому, что в середине линии AB токовые линии (см. рис. 46) направлены перпендикулярно к плоскости крутопадающей жилы и ее влияние плохо сказывается на изменении плотности тока. В то же время крутопадающие неоднородности, находящиеся

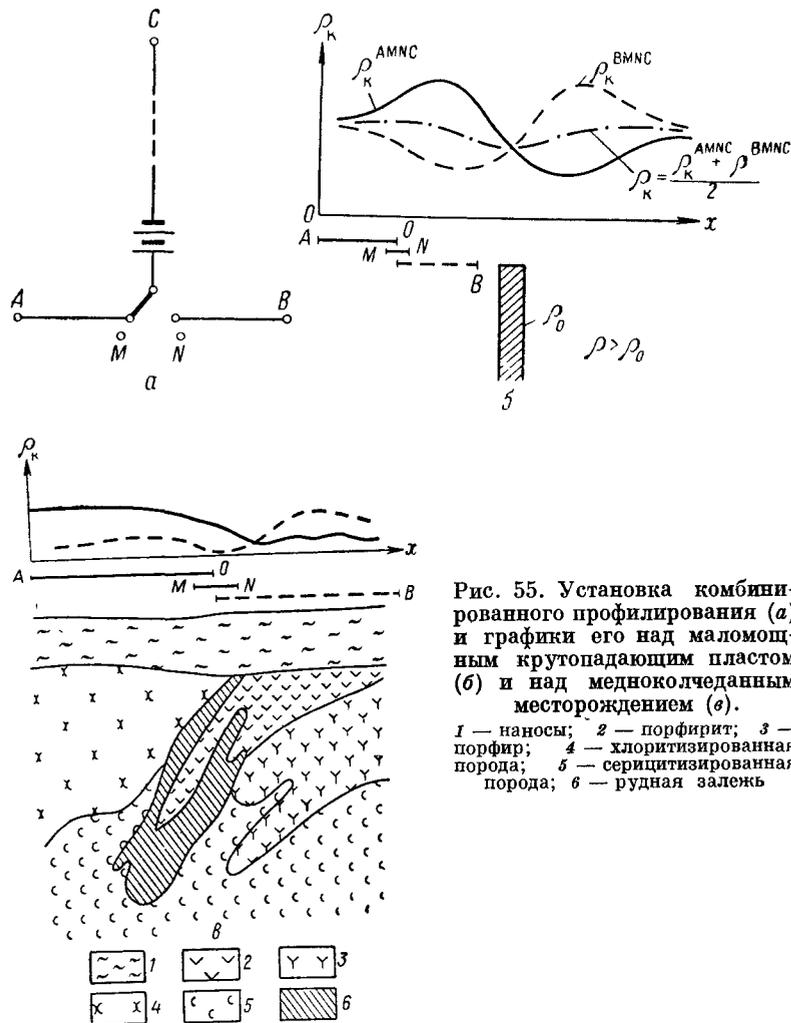


Рис. 55. Установка комбинированного профилирования (а) и графики его над маломощным крутопадающим пластом (б) и над медноколчеданным месторождением (в).

1 — наносы; 2 — порфирит; 3 — порфир; 4 — хлоритизированная порода; 5 — серицитизированная порода; 6 — рудная залежь

точечная установка. Наиболее широкое применение получила установка комбинированного профилирования (рис. 55, а). В ней имеется дополнительное питающее заземление C , которое отнесено от середины MN в перпендикулярном направлении на большое расстояние (в бесконечность). Измерение разности потенциалов между электродами M и N ведется на каждой точке дважды: одно измерение при токе в линии AC (прямая установка $AMNC_{\infty}$), другое — при токе в линии BC (обратная установка $BMNC_{\infty}$). Это позволяет получить по профилю два графика. Особенности комбинированного профилирования рассмотрим на примере изучения маломощного крутопадающего хорошо проводящего пласта с удельным сопротивлением ρ_0 , залегающего в среде высокого сопротивления ρ . Величину ρ_k , измеренную при токе в линии AC , будем обозначать ρ_k^{AMNC} , а при токе в линии BC — через ρ_k^{BMNC} . К заземлению A и B подключен отрицательный полюс батареи, а к заземлению C подключен отрицательный полюс батареи, а к заземлению A и B подключается положительный полюс.

Когда установка находится на удалении от пласта, величины ρ_k^{AMNC} и ρ_k^{BMNC} одинаковы и определяются удельным сопротивлением ρ вмещающей среды. По мере приближения установки к пласту слева ток все более устремляется в сторону пласта. Поэтому величина ρ_k^{AMNC} растет, поскольку плотность j_{MN} тока между заземлениями MN увеличивается, а величина ρ_k^{BMNC} уменьшается, так как плотность тока в этом случае уменьшается. Если установка приближается к пласту справа, картина распределения ρ_k^{AMNC} и ρ_k^{BMNC} будет обратной. Построенные по результатам наблюдения графики ρ_k^{AMNC} и ρ_k^{BMNC} в точке над серединой пласта пересекаются, образуя так называемое «проводящее перекрестие». Оно характерно для хорошо проводящих крутопадающих линз рудных тел.

Среднеарифметическое между величинами ρ_k^{AMNC} и ρ_k^{BMNC} равно величине ρ_k , полученной с установкой $AMNB$, т. е.

$$\rho_k^{AMNB} = \frac{\rho_k^{AMNC} + \rho_k^{BMNC}}{2}$$

График ρ_k^{AMNB} можно получить по графикам комбинированного профилирования, если провести между ними среднюю линию. Как показано на рис. 55, б, маломощный проводящий пласт на осредняющем графике выделяется гораздо менее четко, чем на графиках комбинированного профилирования.

Графики комбинированного профилирования изображают сплошной (для прямой установки) и пунктирной (для обратной установки) линиями.

Под графиками в линейном масштабе показывают размеры установки (рис. 55, б). Одним из недостатков рассмотренных выше установок является систематическое изменение условий заземления. В условиях резко неоднородного геоэлектрического

вблизи питающего заземления, существенно изменяют характер прохождения тока. Если жила хорошо проводящая, большая часть тока устремляется в ее сторону. При наличии плохо проводящей жилы ток экранируется ею. И в том и другом случаях резко изменяется картина распределения плотности тока. Поэтому для картирования маломощных неоднородностей применяется трех-

разреза (наличие проводящих карстовых полостей, локальных низкоомных зон в пределах рудных полей месторождений) это может вносить существенные искажения величины ρ_k , особенно при работе с трехточечной установкой.

Так, при перемещении электрода A над локальным проводящим объектом, большая часть тока будет устремляться по нему, вследствие чего между электродами M и N будет наблюдаться понижение плотности тока и, следовательно, понижение величины ρ_k . Мы получим минимум ρ_k , не связанный с неоднородностью среды между приемными электродами. При перемещении электрода A через плохопроводящую жилу, по мере приближения к ней, ток будет экранироваться ею, а после ее прохождения ток будет устремляться в сторону приемных электродов, и мы получим сначала минимум, а затем максимум ρ_k , обусловленные плохопроводящей жилой у электрода A .

Кроме того, при работе с установками больших размеров, когда применяют большой ток и соответственно большое число заземлителей A и B , постоянное перемещение установки ведет к большим затратам времени и средств и резко снижает темпы изучения территории.

В этих случаях применяют установку срединных градиентов. Она представляет собой четырехточечную установку $AMNB$, у которой на каждой стойке электроды A и B неподвижны, а измерительная линия перемещается в пределах обычно средней трети расстояния AB . Наблюдения производят как вдоль линии AB , так и на нескольких параллельных ей профилях. Совокупность наблюдаемых профилей на одной стойке питающей линии образует планшет. После наблюдения планшета линия AB смещается на $1/3 AB$, и наблюдения выполняются на следующем планшете. Поскольку в пределах средней трети линии AB электрическое поле в однородной среде однородно, то неоднородности разреза на участке перемещения электродов MN выделяются более четко.

При работе с установкой срединного градиента удобнее и экономнее наблюдения вести аппаратурой ИКС, у которой сила тока в питающей цепи стабилизирована, а измерение разности потенциалов микровольтметрами можно выполнять одновременно на нескольких профилях.

Реже применяют дипольные установки, основное преимущество которых заключается в том, что записанные с их помощью графики ρ_k более дифференцированы по сравнению с графиками других установок. Это дает возможность более уверенно обнаруживать искомые объекты и надежно определять их местоположение. Поэтому дипольные установки применяются для изучения крутопадающих неоднородностей.

Поскольку в дипольной установке питающая и приемная линии разобщены, на результаты измерений не сказываются индуктив-

ные помехи и утечки из линии AB . Недостатками дипольных установок является сильное влияние поверхностных неоднородностей разреза на результаты измерений. Кроме того, при работе с ними необходимо применять источники питания повышенной мощности, поскольку плотность тока питающего диполя убывает значительно быстрее при удалении от него, чем в установках других типов. Наиболее широко применяются дипольно-осевая и двусторонняя дипольно-осевая установки. Для последней характерно наличие двух измерительных диполей, расположенных симметрично относительно диполя AB . Дипольные установки широко применяются в морской электроразведке.

Возможности дипольно-осевой установки и ее преимущества перед симметричной $AMNB$ изображены на рис. 56 на примере картирования крутопадающего контакта, разделяющего две среды с удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2 , где $\rho_1 = 10 \rho_2$. По форме график ρ_k дипольно-осевой установки аналогичен графику ρ_k симметричной установки, у которой $M_1N_1 = MN$ и AO равно разноту дипольной установки. Однако в области контакта амплитуда ρ_k , измеренного симметричной установкой, меньше амплитуды ρ_k , измеренного дипольно-осевой. Таким образом, задача картирования дипольно-осевой установкой решается более успешно.

При наблюдении с двухсторонней дипольно-осевой установкой применяют две питающие линии, поочередно включая в них ток и измеряя величину ρ_k приемного диполя. Это дает возможность судить об изменении геоэлектрического разреза в обе стороны от центра установки и, с другой стороны, учитывать влияние рельефа и поверхностных неоднородностей вблизи приемных заземлений. Двустороннее дипольно-осевое профилирование, наряду с комбинированным, применяется для поисков крутопадающих хорошо проводящих тел пластового типа. Отсутствие в такой установке заземления в бесконечности значительно упрощает полевые наблюдения по сравнению с комбинированным профилированием.

Результаты электропрофилеирования изображают в виде графиков ρ_k по профилям или карт графиков и изолиний ρ_k , если работа ведется в площадном варианте. При наблюдении с установкой

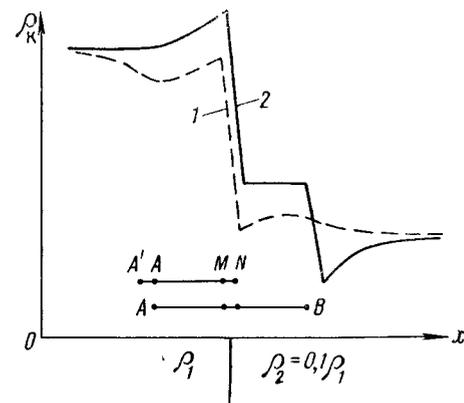


Рис. 56. Графики ρ_k , полученные симметричной (1) и дипольно-осевой (2) установками над контактом пород

срединных градиентов карты изолиний ρ_k обычно не составляют, потому что полученные значения ρ_k на границах двух планшетов вследствие некоторой неоднородности нормального поля в одной трети установки обычно не совпадают. Производят качественную интерпретацию результатов. На графиках и картах пониженными значениями ρ_k выделяются неглубокозалегающие рудные тела, обводненные зоны трещиноватости, участки повышенной мощности рыхлых отложений, карстовые обводненные или заполненные глиной полости, глинистые и углисто-глинистые сланцы. Повышенными значениями выделяются высокоомные скальные породы, особенно мало перекрытые рыхлыми отложениями.

По результатам работ составляют схематические карты, которые используют затем при построении геологических карт и поисковых геологических работах.

На рис. 55, в показаны графики ρ_k установки комбинированного профилирования над медноколчеданным месторождением.

§ 40. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Глубинность электроразведки возрастает с увеличением расстояния между источником поля и точкой наблюдения. Эта особенность используется в методе электрического зондирования. Для его выполнения применяют симметричную и дипольную установки. При зондировании с симметричной установкой AMNB изучают зависимость кажущегося сопротивления от разности AB при неподвижном центре установки. В дипольном зондировании изучают зависимость ρ_k от расстояния между центрами питающего и измерительного дipoлей.

1. Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)

Электрическое зондирование с симметричной установкой AMNB широко известно под названием метода ВЭЗ. Рассмотрим возможности его при зондировании двухслойного горизонтального разреза (рис. 57, а). Верхний слой I мощностью h выходит на поверхность и имеет удельное сопротивление ρ_1 . Ниже залегает слой II весьма большой (теоретически бесконечной) мощности и сопротивлением $\rho_2 > \rho_1$.

Отложим по оси абсцисс величину ρ_k , по оси ординат — величину полуразноса $AB/2$, при котором получено данное значение ρ_k (рис. 57, б). Когда $AB/2$ значительно меньше мощности h , то на результаты измерений влияния слоя II практически не сказывается. При уменьшении $AB/2$ величина ρ_k стремится к истинному значению ρ_1 . На графике верхняя ветвь кривой асимптотически стремится к линии $\rho_k = \rho_1$.

При увеличении $AB/2$ все большее влияние на величину ρ_k оказывает слой II. Так как слой II имеет более высокое сопротив-

ление, то ток экранируется, вследствие чего плотность его между измерительными электродами возрастает, следовательно, увеличивается и кажущееся сопротивление. Начиная с некоторого полуразноса $AB/2$, в несколько раз превышающего h , на величину ρ_k оказывает влияние слой II и нижняя ветвь графика асимптотически стремится к ρ_2 . Чем глубже залегает слой II, тем больше величина полуразноса $AB/2$, при которой начинает проявляться влияние слоя II.

Если $\rho_1 > \rho_2$, график зависимости ρ_k от полуразноса $AB/2$ имеет вид, изображенный на рис. 56 справа.

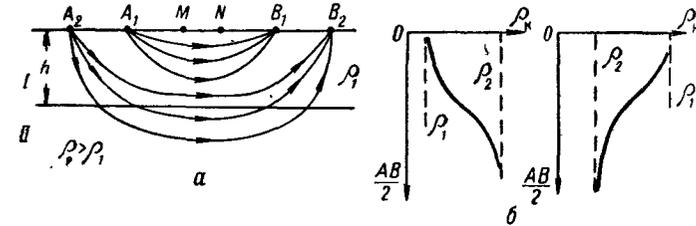


Рис. 57. Двухслойный геоэлектрический разрез (а) и кривые зондирования (б)

Аналитически зависимость ρ_k от величины $AB/2$ и параметров двухслойного разреза определяется формулой

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_{1,2}^i \left(\frac{L}{h}\right)^3}{\left[\left(\frac{L}{h}\right)^2 + (2i)^2\right]^{3/2}} \right\},$$

где $K_{1,2}^i = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ — коэффициент отражения; h — мощность верхнего слоя; $L = AB/2$.

Эту формулу можно записать в несколько ином виде;

$$\rho_k = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1}\right)^i \cdot \left(\frac{L}{h}\right)^3}{\left[\left(\frac{L}{h}\right)^2 + (2i)^2\right]^{3/2}} \right\},$$

где отношение $\rho_2 / \rho_1 = \mu_1$ называют модулем разреза. Если модуль μ_1 принять постоянной величиной, то выражение в фигурных скобках зависит от соотношения L/h , т. е.

$$\rho_k = \rho_1 f\left(\frac{L}{h}\right).$$

Логарифмируя величину ρ_k , получим

$$\lg \rho_k = \lg \rho_1 + \lg f\left(\frac{L}{h}\right).$$

Если по оси абсцисс откладывать $\lg \rho_k$, то при постоянном μ_1 форма полученных графиков не зависит от величины ρ_1 . Изменение величины ρ_1 приводит лишь к параллельному смещению графика по оси ординат. Если прологарифмировать аргумент функции $f(L/h)$, то получится выражение $\lg L - \lg h$. Следовательно, если по оси ординат графика откладывать логарифм величины $AB/2$, то на форму кривой не влияет изменение мощности h . Оно будет лишь смещать график вдоль оси $AB/2$.

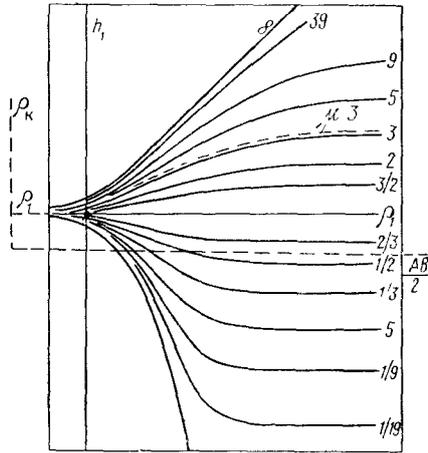


Рис. 58. Двухслойная палетка

а правые ветви — соответственно к линии $\rho_2 = \mu_1 \rho_1$. В случае бесконечно большого сопротивления второго слоя ($\mu_1 = \infty$) кривые выходят на асимптоту, идущую через крест палетки под углом 45° .

Трехслойный горизонтально-слоистый разрез характеризуется в электроразведке удельными сопротивлениями ρ_1, ρ_2 и ρ_3 трех слоев, величинами мощностей h_1 и h_2 первого и второго слоев. Мощность третьего слоя принимается бесконечной. Для различных соотношений параметров трехслойного разреза рассчитаны и построены трехслойные кривые ВЭЗ. При их построении приняты отношения $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, $\mu_2 = \rho_3/\rho_1$ и $\nu_1 = h_2/h_1$. Семейство (альбом) трехслойных кривых состоит из отдельных палеток. В широко распространенном альбоме палеток А. М. Пылаева каждая палетка состоит из набора кривых ВЭЗ, имеющих постоянное значение модулей μ_1 и μ_2 .

Отдельные кривые различаются по модулю ν_1 . Величины ρ_1 и h_1 при построении кривых палеток приняты также за единицу.

Теоретические кривые для многослойных разрезов построены в двойном логарифмическом (билогарифмическом) масштабе с мо-

дулем $AB/2$.

Для теоретической оценки влияния параметров двухслойного разреза рассчитано и построено для различных соотношений ρ_2/ρ_1 семейство кривых (рис. 58), называемое двухслойной палеткой ρ_2 . На ней величины h_1 и ρ_1 приняты за единицу. Точка пересечения линий h_1 и ρ_1 называется крестом палетки. Цифры обозначают модуль μ_1 кривых. Теоретические кривые, построенные для двухслойного разреза, носят название двухслойных теоретических кривых ВЭЗ. Левые ветви кривых асимптотически приближаются к линии ρ_1 ,

дулем 6,25 см. Форма трехслойных теоретических кривых ВЭЗ изображена на рис. 59.

В зависимости от соотношения удельных сопротивлений слоев кривые разделяют на следующие типы: А при $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$; Н при $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$; К при $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$; Q при $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$. При небольшой величине $AB/2$ по сравнению с мощностью первого слоя h_1 величина ρ_k определяется удельным сопротивлением первого слоя ρ_1 и при бесконечном уменьшении $AB/2$ по сравнению с h_1 ρ_k стремится асимптотически к ρ_1 . При $AB/2$, значительно превышающей суммарную мощность слоев h_1 и h_2 , величина ρ_k асимптотически приближается к ρ_3 . При некотором промежуточном значении $AB/2$, соизмеримом с глубиной до второго слоя, на форме кривой ВЭЗ сказывается влияние слоя h_2 .

Геоэлектрический разрез, состоящий из четырех и большего числа слоев, характеризуется удельными сопротивлениями $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ слоев и мощностями h_1, h_2, \dots, h_{n-1} слоев. Мощность последнего слоя принимается равной бесконечности. Кривые ВЭЗ многослойного разреза обозначают с помощью сочетания букв А, К, Н и Q. Четырехслойные кривые обозначают двумя буквами: первая характеризует трехслойный разрез ρ_1, ρ_2, ρ_3 , а вторая такой же разрез с удельными сопротивлениями ρ_2, ρ_3, ρ_4 , например, АА, КQ, АК и т. д.

В теории электроразведки рассматриваются понятия продольной проводимости $S = h/\rho$ и поперечного сопротивления $T = h\rho$ пласта. Доказано, что форма многослойной кривой не нарушается, если величины S_i (для разрезов типа Н и А) или T_i (для разрезов К и Q) промежуточных пластов остаются неизменными, хотя величины параметров h_i и ρ_i могут пропорционально изменяться. Это явление получило название принципа эквивалентности, а совпадающие по форме кривые ВЭЗ называются эквивалентными. Трехслойные кривые типов Н и А эквивалентны при неизменной величине $S_2 = h_2/\rho_2$, а кривые К и Q — при неизменной величине $T_2 = h_2\rho_2$. Особенно отчетливо принцип эквивалентности проявляется при малых мощностях промежуточных слоев. Теоретические кривые, рассчитанные для горизонтально-слоистых сред, сведены в альбомы кривых ВЭЗ. Эти

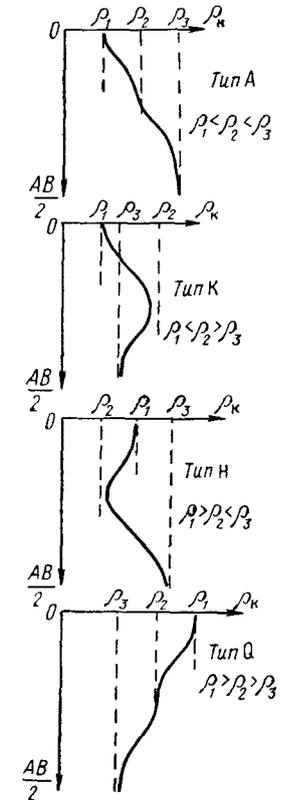


Рис. 59. Трехслойные кривые зондирования

альбомы используются при количественной интерпретации полученных в поле наблюдаемых кривых ВЭЗ. Теоретические кривые ВЭЗ используются при наклоне слоев $5-10^\circ$, так как кривые ВЭЗ над этими слоями не отличаются от кривых, соответствующих горизонтально-слоистым средам. Однако область применения метода ВЭЗ не ограничивается изучением слабо наклонных геоэлектрических разрезов. Его широко применяют для изучения глубинных особенностей локальных геоэлектрических неоднородностей, в частности, зон изменения мощности рыхлых отложений, изучения карстовых полостей, поисков рудных залежей, трещинных обводненных зон. В этих случаях основное внимание обращают на качественное истолкование результатов, а ориентировочная оценка глубины залегания неоднородностей выполняется на основе корреляционных зависимостей данных ВЭЗ и результатов бурения.

2. Методика полевых работ по методу ВЭЗ

Полевые наблюдения по методу ВЭЗ заключаются в измерении кажущегося сопротивления при последовательно увеличивающейся длине линии AB . Между длиной линий AB и MN соблюдаются определенные соотношения. В электроразведке рекомендуются соотношения полуразносов $AB/2$ и $MN/2$ в метрах (в пределах до $AB = 1000$ м), они приведены в табл. 11.

Таблица 11

$AB/2$	$MN/2$	$AB/2$	$MN/2$	$AB/2$	$MN/2$
1,5	0,5	25	3	220	12
3	0,5	40	3	220	40
5	0,5	40	12	340	12
9	0,5	65	3	340	40
9	3	65	12	500	40
15	0,5	100	12	500	40
15	3	150	12		

При переходе от одной величины MN к другой два последних измерения повторяются. Это необходимо для увязки результатов, полученных с различными MN .

В установке с небольшими разносами ($AB < 2$ км) измерение проводят с помощью приборов ЭСК или ИКС. Приемная и питающая линии состоят из двух полуразносов $AB/2$ и $MN/2$. Каждый из них наматывается на катушку. Измерение величин ΔU и I начинают на меньших разносах ($AB/2 = 1,5$ м, $MN/2 = 0,5$ м), затем катушки разматывают до появления меток следующих полуразносов ($AB/2 = 3$ м) и вновь выполняют измерения. В процессе измерений вычислитель определяет по формуле (20) величину ρ_k и на билогарифмическом бланке строит кривую ВЭЗ:

по оси ординат откладывает $AB/2$, по оси абсцисс — ρ_k . Вычислитель следит за плавностью хода кривой ВЭЗ и в случае «выскоков» информирует оператора, который обязан повторить измерение. Команду о размотке провода для следующего разноса оператор отдает лишь тогда, когда убедится в плавности хода кривой.

Вертикальное зондирование с большими разносами ($AB > 2$ км) выполняют обычно с помощью электроразведочной станции и применяют две питающие линии: малую и большую. Малая линия $A'B'$ имеет длину 1—2 км. Электрический ток подают от батарей генераторной группы станции. Измерения выполняют также приборами ЭСК или ИКС. Большая линия AB (свыше 2 км) питается от генератора, а измерение на ней выполняют с помощью осциллографа измерительной лаборатории. Измерения на малой линии выполняют во время подготовки большой линии или в промежутках между замерами на последней, так как переходы с одного разноса на другой занимают на большой линии значительно больше времени, чем на малой. Для увязки двух частей кривой ВЭЗ, полученных на двух питающих линиях, применяют один — два общих для них разносов, на которых измерения выполняют с ЭСК (или ИКС) и со станцией.

Питающие разносы большой линии AB монтируются из отрезков провода длиной по 500 м, намотанных на катушки. В начале и конце провода каждой катушки наносят на расстоянии 3—5 м от концов начальную и конечную метки так, чтобы между ними было расстояние 500 м. Изменение разноса большой питающей линии выбирают кратным 500 м. После размотки одной катушки следующую катушку устанавливают у конца размотанного провода. Конечную метку первой и начальную метку второй катушек совмещают и разматывают вторую катушку и т. д. Со стороны конечных меток к проводам присоединяют вилки, с помощью которых их подключают к панелям катушек.

В точке заземления питающих линий применяют несколько параллельно соединенных стержневых электродов. Число их должно быть таким, чтобы на каждый электрод приходилось не более 0,5 А питающего тока.

Подготовка разносов питающих линий значительно ускоряется с помощью электроразведочного агрегата ЭРА. Для заземления питающих линий агрегат задавливает штанги-электроды диаметром 42 мм на глубину нескольких метров, а после измерений извлекает их.

Полуразносы приемных линий большой длины (более 250 м) готовят из отрезков проводов, каждый из которых наматывают на отдельную катушку. В качестве приемных заземлений применяют неполяризующиеся электроды (см. § 42), у которых величина поляризации сохраняется во времени по возможности постоянной.

Надежность электрических контактов проводов питающих и приемных линий проверяют с помощью автокомпенсатора.

Для этого оба конца испытуемого отрезка провода подключают к клеммам MN прибора и компенсатором поляризации вводят в измерительную линию 40—50 мВ. Отклонение стрелки прибора указывает на отсутствие обрыва жилы провода.

Генераторную группу и измерительную лабораторию устанавливают около центра установки ВЭЗ. Линию AB подключают к выходной панели генератора, а измерительную линию MN — к входной панели лаборатории. Генераторную группу и измерительную лабораторию соединяют пятижильным кабелем для связи и управления контакторами и заземляют. Сопротивление заземления не должно превышать 50 Ом. Операторы проверяют надежность управления контакторами, работу генераторов, переговорного устройства и линии связи с рабочими на питающих заземлениях, работу осциллографа и других устройств. С помощью мегометра станцию проверяют на утечку. Сопротивление изоляции регистрирующих каналов относительно осциллографа должно быть не менее 50 МОм.

Телефоны для прослушивания во время замеров подключают параллельно питающему заземлению, а после получения сигнала о передаче распоряжений — непосредственно между концом линии и питающим заземлением. Рабочие, обслуживающие питающую линию, должны иметь резиновые сапоги и перчатки.

После проверки по телефону о готовности питающих заземлений оператор измерительной лаборатории дает указание оператору генераторной группы о типе питания (батарежное или генераторное) и режиме работы (удвоенные или однополярные импульсы). Далее оператор измерительной лаборатории включает освещение осциллографа и устанавливает блики гальванометра. При работе в режиме однополярных импульсов блик должен находиться у края шкалы, а в режиме удвоения — на середине шкалы. Путем подачи в линию AB пробных импульсов тока, регулируя ток и чувствительность осциллографа, оператор выбирает такие условия регистрации, чтобы отклонение блика гальванометра ΔU было не меньше 10 мм, а блика токового гальванометра — не меньше 25 мм. Перед началом регистрации в измерительный канал подают градуировочный импульс ΔU , величина которого должна быть соизмерима с рабочим импульсом.

Подобрав оптимальные условия регистрации, оператор измерительной лаборатории запускает лентопротяжный механизм осциллографа и производит запись нескольких рабочих импульсов. Длительность импульсов выбирается опытным путем в результате пробных наблюдений в районе. Скорость протяжки ленты должна обеспечивать ширину импульсов на бумаге не менее 2—6 см. При отсутствии помех записывают два — три импульса, а при наличии помех — не менее пяти — шести с тем, чтобы два — три импульса были приурочены к моментам более спокойного поля помех. В конце записи оператор подает несколько коротких импульсов, предупреждая телефонистов на питающих заземле-

ниях об окончании измерений на данном разnose. Далее оператор выключает питающий ток и записывает градуировочные импульсы в каналах регистрации разности потенциалов и тока. Затем он выключает осциллограф и сообщает оператору генераторной группы об окончании замера. Оператор генераторной группы выключает питание контакторов, а водитель останавливает двигатель автомашины.

После окончания измерений осциллограмму проявляют. Убедившись в хорошей записи рабочих и градуировочных импульсов и в отсутствии резких искажений из-за помех, оператор измерительной лаборатории дает указание рабочим о переходе на следующий разнос. Если качество записи неудовлетворительное, регистрацию на данном разnose повторяют.

На проявленных осциллограммах для каждого разноса питающей линии определяют величины ΔU_{MN} и I_{AB} . Осциллограммы записи ΔU_{MN} обычно осложнены помехами, возникающими при включении и выключении тока (индуктивными процессами, явлением вызванной поляризации), а также влиянием плавно меняющихся помех. Поэтому отчетная нулевая линия определяется путем параллельного перемещения установленной части импульсов до такого положения, когда она будет естественным продолжением нулевой линии (рис. 60), записанной в перерывах между импульсами. По величине этого смещения определяют амплитуду градуировочного I_r или рабочего I импульсов в милливольтах известна, по формуле (21) определяют m_r . Зная величину I , по формуле (22) определяют амплитуду импульсов в милливольттах. При наличии нескольких импульсов каждый из них обрабатывают отдельно и определяют среднюю их амплитуду.

Аналогично, сравнивая градуировочные и рабочие импульсы тока, определяют величину I_{AB} . Импульсы тока имеют строго прямоугольную форму, поэтому определение нулевой линии и амплитуды импульсов на осциллограмме не представляет трудности.

Результаты обработки заносят в специальный журнал, где вычисляют для каждого разноса величину ρ_k .

§ 3. Интерпретация результатов метода ВЭЗ

Результаты измерений методом ВЭЗ в начале интерпретируют качественно. Качественная интерпретация заключается в анализе кривых и в построении карт типов кривых ВЭЗ, разрезов

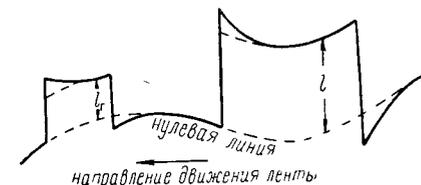


Рис. 60. Определение ΔU_{NM} по осциллограмме

кажущихся сопротивлений, карт изолиний ρ_k на определенных разносах, карт продольной проводимости, поперечного сопротивления и т. д.

Качественный анализ кривых позволяет сделать выводы о соотношениях удельных сопротивлений и мощностях исследуемых слоев. Карты типов кривых ВЭЗ составляют при площадных исследованиях. На план участка выносят расположение точек наблюдений, в каждой точке подписывают тип полученной кривой, затем выделяют контуры площадей распространения однотипных кривых. Далее путем анализа имеющихся сведений о геоэлектрическом разрезе участка устанавливают связь характера

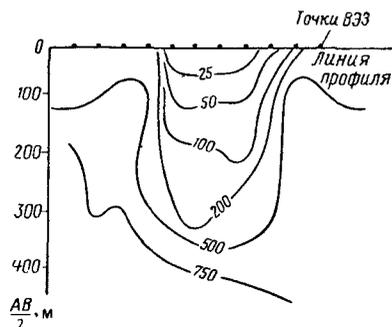


Рис. 61. Разрез кажущегося сопротивления (в ом-метрах) в области увеличенной мощности рыхлых отложений

кривых ВЭЗ с особенностями геологического строения. В результате этого карта типов кривых ВЭЗ приобретает конкретный геологический смысл. Качественное суждение о разрезе на глубину вдоль линии профиля дают разрезы кажущихся сопротивлений. Их строят следующим образом. В точках профиля, где проводили наблюдения, откладывают по вертикали в линейном или логарифмическом масштабе величины $AB/2$ и в полученных точках записывают величину ρ_k . Затем проводят линии равных кажущихся сопротивлений. Сечение изолиний выбирают с таким расчетом, чтобы отразить все необходимые детали, которые могут представлять геологический интерес. На рис. 61 изображен разрез кажущегося сопротивления в области увеличенной мощности рыхлых отложений. На основании площадных измерений методом ВЭЗ строят карты изолиний ρ_k для различных разносов. Для построения карты выбирают такой разнос, который наиболее отчетливо отражает интересующие детали геологического строения.

Выбор формы представления данных ВЭЗ зависит от характера съемки (профильные или площадные исследования) и конкретных геологических задач.

Количественная интерпретация ВЭЗ выполняется путем сравнения наблюдаемых кривых с палеточными. При количественной интерпретации наблюдаемой кривой ВЭЗ ее вычерчивают на прозрачной бумаге в координатах ρ_k и $AB/2$ (см. рис. 58), накладывают на палетку и перемещают таким образом, чтобы оси координат палетки и кривой были параллельны, до наилучшего совпадения с какой-либо палеточной кривой. После этого на прозрачной бумаге отмечают крест палетки, проектируя который на ось $AB/2$ получают значение параметра h_1 , а проекция креста на ось ρ_k

покажет в масштабе кривой величину ρ_1 . Далее, переписывая модуль кривой $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$, можно определить величину $\rho_2 = \mu_1\rho_1 = 3\rho_1$. С помощью специальных комплектов теоретических кривых ВЭЗ выполняют количественную интерпретацию многослойных кривых.

По результатам количественной интерпретации строят геоэлектрические разрезы и карты. Для построения разреза по линии профиля по вертикали от точек наблюдений наносят границы слоев, надписывают их удельные сопротивления и соединяют линиями границы слоев с близкими удельными сопротивлениями. Геоэлектрические разрезы при четкой дифференциации пород по величине ρ_k позволяют выявить структурные особенности слагающих толщ. На основании разрезов можно построить различные модификации карт. Так, карта изолиний $h_1 + h_2 = H$ будет отражать структуру высокоомного опорного горизонта (например, кристаллического фундамента или мощного слоя известняков или доломитов под песчано-глинистыми отложениями). Карта равных значений удельного сопротивления, например слоя h_2 , позволит выделить трещинные обводненные тектонические зоны и т. д.

Принцип эквивалентности приводит к неоднозначности количественной интерпретации многослойных кривых ВЭЗ. Так, для уверенной интерпретации трехслойной кривой необходимо знать величину ρ_2 . Она может быть получена по результатам параметрических зондирований на скважинах. Если удельное сопротивление ρ_2 неизвестно, то строят карты приведенных мощностей $h_2 = T_2/\rho_{2cp}$; $h_2 = S_2\rho_{2cp}$, где ρ_{2cp} — среднее значение удельного сопротивления второго слоя, полученное по результатам приближенной интерпретации по всему участку; $S_2 = h_2/\rho_2$ — продольная проводимость второго слоя (для кривых типа Н и А); $T_2 = \rho_2 h_2$ — поперечное сопротивление второго слоя (для кривых типов К и Q).

4. Дипольное электрическое зондирование

С помощью дипольного зондирования решаются те же геологические задачи, что и при ВЭЗ. Измерения обычно выполняют осевыми (ДОЗ), экваториальными (ДЭЗ), реже азимутальными (ДАЗ) установками. Измерительный диполь обычно остается на месте, а питающий перемещается в том или ином направлении (в зависимости от типа установки). В процессе зондирования по мере увеличения разнosa увеличивают размеры питающего и измерительного диполей, чтобы поддерживать величину измеряемой разности потенциалов на уровне, обеспечивающем ее уверенное измерение. Для соблюдения условий дипольности установки размеры приемного диполя не должны превышать $0,2r$ (r — разнос установки), а длина AB в осевой установке не должна превышать $0,2r$, в азимутальной — не более $0,6r$, а в экваториальной — от $0,6r$ до $1,3r$. Дипольное зондирование с

разносом до 2 км выполняют с помощью переносной аппаратуры ЭСК или ИКС, а с разносом более 2 км — обычно с электроразведочной станцией.

По результатам зондирования на билогарифмическом бланке строят кривые зондирования в виде зависимости ρ_k от r .

Для интерпретации кривых дипольных зондирований применяют те же способы, что и при интерпретации кривых ВЭЗ. Для количественной интерпретации кривых ДЭЗ и ДАЗ используют альбомы палеток симметричной установки ВЭЗ, а для интерпретации кривых дипольно-осевого зондирования — специально рассчитанные теоретические кривые ДОЗ.

5. Определение удельного электрического сопротивления горных пород

Удельное электрическое сопротивление горных пород необходимо знать для правильной интерпретации результатов электро-разведочных работ. Из многочисленных способов лабораторного определения удельного сопротивления образцов горных пород наибольшее распространение имеет способ с применением четырех-электродных установок. Он заключается в том, что с помощью двух электродов A и B к образцу подводят электрический ток, а между двумя другими электродами измеряют разность потенциалов ΔU . Затем по формуле (20) определяют удельное сопротивление. Коэффициент K формулы для данной установки определяют с помощью образца с известным удельным сопротивлением $\rho_{эт}$ по формуле $K = \rho_{эт} (I/\Delta U)$.

Для измерения ρ по образцам зерна последние выпиливают в виде правильных цилиндров с плоскими торцовыми поверхностями. С торцов образец зажимают двумя латунными дисковыми электродами AB с прокладками из войлока, пропитанными водой той же минерализации, что и насыщающий образец. Приемные электроды в виде станиолевых колец располагают на средней части образца. Они плотно охватывают образец. Удельное сопротивление образца зерна определяют по формуле

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4l} \frac{\Delta U}{I},$$

где d — диаметр образца; l — расстояние между измерительными электродами.

Надежные результаты по определению удельного сопротивления руд будут получены в том случае, когда влажность образцов и минерализация воды в них соответствуют таковым в их естественном состоянии. Для большинства горных пород это условие не соблюдается, поэтому в практике измерение удельного сопротивления образцов производится крайне редко. Оно выполняется лишь в случае методических работ с целью изучения изменения ρ в зависимости от состава, структуры, влажности, температуры

и других факторов. Наиболее надежным способом оценки удельного сопротивления разрезов является выполнение так называемых параметрических замеров на обнажениях и горных выработках или параметрических зондирований и электрического каротажа скважин.

На обнажениях или стенках горных выработок параметрические замеры выполняют обычно установкой АМНВ, разнос которой составляет не более одной трети наименьшего линейного размера стенки выработки или обнажения. В этом случае измеренная величина будет близка к истинному удельному сопротивлению вскрытой горной породы.

Параметрические зондирования у скважин и шурфов выполняют методом ВЭЗ. Для учета влияния на величину ρ_k азимута разноса измерения ведут при двух взаимно перпендикулярных ориентировках питающей линии. Зная мощность h слоя, который зафиксирован на кривой ВЭЗ, и определяя с помощью альбома палеток или другим способом параметры S или T , величину удельного сопротивления слоя вычисляют по формуле $\rho = h/S$ или $\rho = T/h$.

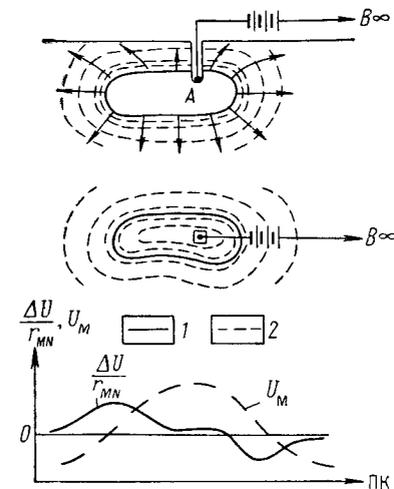


Рис. 62. Токосные линии (1) и эквипотенциальные поверхности (2) (в разрезе и в плане) и график градиента потенциала на дневной поверхности

§ 41. МЕТОД ЗАРЯДА

Метод заряда применяется для прослеживания и оконтуривания вскрытых горными выработками или в результате эрозии геологических образований, удельное электрическое сопротивление которых значительно меньше сопротивления вмещающих пород. Основное применение метод находит при разведке медно-колчеданных и других руд с высокой электропроводностью, а также для определения направления и скорости движения подземных вод.

В методе заряда один из питающих электродов A заземляется в прослеживаемый объект, а другой относится в бесконечность, практически на расстояние в 10—15 раз превышающее предполагаемые размеры объекта. При заземлении электрода A в рудное тело, подсеченное скважиной, вокруг него образуется электрическое поле (рис. 62). Поскольку удельное сопротивление тела во много раз ниже сопротивления вмещающих пород, то тело можно рассматривать как большой электрод, с которого ток стекает по всем направлениям в окружающую среду. В таком случае линии

равного потенциала в окружающей среде вблизи заряженного тела будут повторять его форму. Когда тело залегает на небольшой, по сравнению с его размерами, глубине, то некоторые из эквипотенциальных линий на дневной поверхности приблизительно ооконтуривают проекцию заряженного тела на дневную поверхность. Вблизи проекции контуров тела будут наблюдаться экстремумы градиента потенциала. Таким образом, измеряя потенциал и его градиент в точках на участке заряженного тела, можно составить представление о его форме и размерах.

Линии равного потенциала над заряженным телом прослеживают с помощью микровольтметра аппаратуры ИКС при подключении приемной линии (искательной цепи) непосредственно к усилителю. В качестве электродов M и N применяют два щупа, представляющие собой медные стержни, соединенные проводом, с изолированными ручками. В разрыв провода подключают микровольтметр. Рабочий устанавливает задний щуп в одну из точек x участка, а оператор поочередно заземляет передний щуп, отыскивая следующую точку x_1 , в которой показание стрелочного индикатора будет нулевым. Поскольку между точками x и x_1 отсутствует разность потенциалов, следовательно, они расположены на эквипотенциальной линии. Далее рабочий переставляет щуп в точку x_1 , а оператор отыскивает новую точку x_2 и т. д. Найденные точки x_1, x_2, \dots закрепляются на местности пикетами, после чего топограф переносит эти точки на план.

Одновременно на участке может работать несколько искательных цепей, каждая из которых прослеживает свою эквипотенциальную линию. Полученная карта изолиний дает чисто качественную картину поля заряженного тела. Поэтому целесообразнее строить карту по результатам измерений потенциалов точек, образующих сеть наблюдений на площади съемки и определяемых относительно условного потенциала опорной точки. Обычно за опорную точку принимается угловая точка планшета. В ней заземляется один из приемных электродов, например N , а электрод M поочередно заземляют в точках пикетов на профилях. Профили разбивают вкост предполагаемого простирания объекта. Длина профилей за его пределами должна в 5 раз превышать глубину изучаемого объекта. Исследования производят приборами ЭСК, ИКС, для питания токовой цепи используют батареи 29-ГРМЦ-13, 69-ГРМЦ-6 или генераторные установки. Для исключения влияния непостоянства силы тока в цепи AB ее измеряют через каждые 5—10 точек и значения потенциала приводят к единице силы тока. В этом случае изолинии на карте проводят с постоянным сечением. Проекция контура заряженного тела определяется по линии максимальных значений градиента потенциала. Концы тела выделяются сгущением изолиний.

Иногда измеряют градиент потенциала над заряженным телом. С этой целью между точками на профилях заземляют электроды M и N и измеряют между ними разность потенциалов. При изме-

рении градиентов необходимо строго соблюдать полярность подключения. Если электрод M расположен впереди по ходу профиля относительно заземления N , то измеренной разности потенциалов приписывают тот знак, на который указывает переключатель полярности прибора. Помимо измерения ΔU , измеряют силу тока. Обычно в прослеживаемом теле заземляется положительный полюс источника тока. Поэтому измеренному значению силы тока приписывают положительный знак

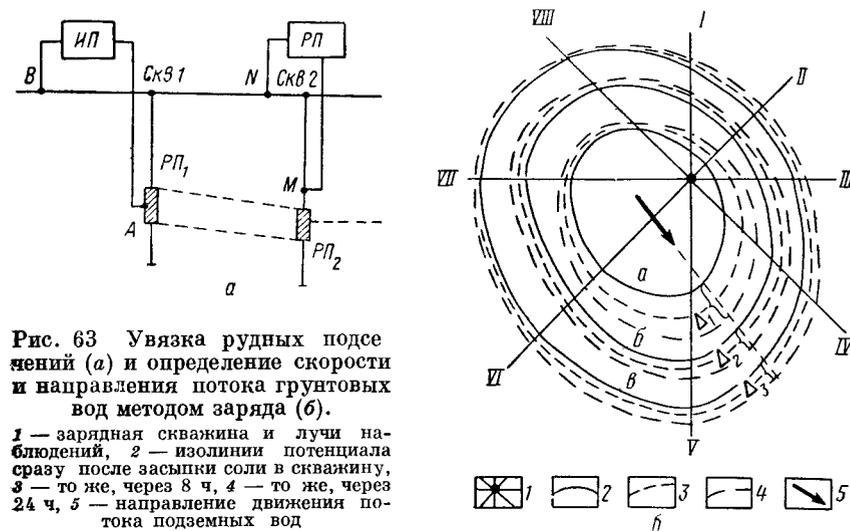


Рис. 63 Увязка рудных подсечений (а) и определение скорости и направления потока грунтовых вод методом заряда (б).

1 — зарядная скважина и лучи наблюдений, 2 — изолинии потенциала сразу после засыпки соли в скважину, 3 — то же, через 8 ч, 4 — то же, через 24 ч, 5 — направление движения потока подземных вод

По измеренным значениям разности потенциалов, силе тока вычисляют среднее значение градиента потенциала (приведенное к единице силы тока) на каждом интервале между соседними точками профиля:

$$\frac{\Delta U}{I} \frac{1}{r_{MN}},$$

где r_{MN} — расстояние между точками наблюдения.

Результаты исследований изображают в виде карт графиков градиента потенциала. Интерпретация их заключается в определении проекции контура тела на дневную поверхность. При этом руководствуются тем, что градиент потенциала у контура тела достигает наибольших значений, а при переходе через ось тела меняет знак

Метод заряда применяют для увязки рудных подсечений, встреченных двумя и более скважинами. Чтобы определить, соединятся ли между собой рудные подсечения $РП_1$ и $РП_2$ (рис. 63, а), встреченные скв. 1 и 2, один из питающих электродов, подключенных к источнику питания $ИП$, заземляют в рудное подсечение

PP_1 (электрод A), электрод B — в бесконечности, а по скв. 2 выполняют измерение потенциала (рис. 63, a) регистрирующим прибором PP . Электрод N заземляют также. Если рудные подсечения соединяются между собой, то электрический ток от заземления A проходит по залежи к рудному подсечению PP_2 и на графике изменения потенциала U_M по скв. 2 напротив подсечения PP_2 будет отмечен максимум. Если подсечения не соединяются, то локального максимума потенциала не будет. В том случае, когда рудная залежь, встреченная в скв. 1, выклинивается, по характеру графика потенциала можно оценить, на каком расстоянии произошло выклинивание. Работа ведется обычно с помощью автоматических каротажных станций. Результаты представляют в виде корреляционной схемы, на которой показывают положение зарядной и измерительных скважин, рудные подсечения, точки зарядов, характер соединения между собой рудных подсечений.

Для определения направления и скорости движения подземных вод методом заряда выбирают скважину, которая вскрыла водоносный пласт. В скважину, в водоносный горизонт, опускают электрод A , объединенный с приспособлением для зарядки скважины солью. С этой целью из пористого материала изготавливают узкий мешок, в него засыпают соль и помещают оголенную часть провода, второй конец которого подключают к полюсу батареи. Электрод B , подключенный к другому полюсу, заземляют на расстоянии, 10—15-кратном глубине до водоносного горизонта.

Сразу же после спуска электрода A в скважину выполняют съемку изолинии потенциала нормального поля. Радиус изолинии при необсаженной скважине берут равным 1,5—2 глубинам, а при обсаженной скважине — 2—3 глубинами залегания водоносного горизонта. Изолинию наблюдают по лучам, пересекающим устье скважины. Заземление N устанавливают на одном из лучей, направленном противоположно предполагаемому направлению потока на расстоянии от устья скважины, равном принятому радиусу изолинии. Второе заземление M последовательно перемещают по соседнему лучу, отыскивая по нулевому отсчету точку равного потенциала, затем электрод M помещают на следующий луч и отыскивают аналогичную точку на нем и т. д. Через некоторое время (от единиц до нескольких десятков часов) прослеживают следующую изолинию потенциала. При этом заземление N остается на прежнем месте. Так, с течением времени прослеживают несколько изолиний потенциала и наносят их на план. Соль, растворяясь в водоносном горизонте, образует движущийся солевой ореол. Направление его движения определяют по направлению смещения фронта изолиний (рис. 63, b). Определив расстояние, на которое смещается фронт изолиний, и промежуток времени между их наблюдением, определяют скорость движения потока подземных вод.

На рис. 63, b показано расположение изолиний a , b и c сразу после засыпки соли, а также через 8 и 24 ч. В течение суток смещения Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 фронтов изолинии равны 12; 7 и 6 м, что соответствует величинам скорости потока 0,5; 0,3; 0,25 м/ч. Средняя величина скорости потока на участке равна $(0,5 + 0,3 + 0,25)/3 = 0,35$ м/ч.

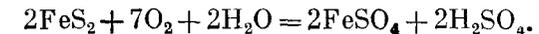
§ 42. МЕТОД ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Общие сведения

В методе естественного электрического поля изучают электрические поля, создаваемые за счет происходящих в природе электрохимических, фильтрационных и диффузионно-адсорбционных процессов.

Электрохимические процессы возникают на поверхности соприкосновения электронных и ионных проводников, на которой происходит скачок потенциала. Вследствие этого электронный проводник по отношению к ионному приобретает потенциал, называемый *электродным*. В процессе окислительно-восстановительных реакций окисляющаяся среда, отдавая электроны, заряжается положительно, а восстанавливающая, присоединяя их, заряжается отрицательно.

Электрохимические потенциалы возникают в местах скопления минералов с электронной проводимостью — пирита, халькопирита, магнетита и других. В зонах сульфидного оруденения вблизи от поверхности земли кислород воздуха, растворенный в поверхностных водах, вызывает окислительную реакцию



Катионы железа абсорбируются пиритом, заряжая его положительно, а вода за счет анионов SO_4^- получает отрицательный заряд. Таким образом, на поверхности рудного тела образуется двойной электрический слой, на внутренней части которого расположены положительные заряды, на внешней — отрицательные. В глубинной части рудного тела, где существует недостаток кислорода, может возникать восстановительная реакция, ведущая к обратной картине распределения зарядов двойного электрического слоя. Вследствие этого внутри рудного тела возникает ток, текущий сверху вниз (рис. 64). Во вмещающих рудное тело породах наблюдается обратная картина. Над рудным телом растворы, окисляющие его, теряют положительные заряды и приобретают отрицательный потенциал, в нижней части — растворы приобретают положительный потенциал. В результате этого токовые линии направляются снизу вверх. Если над рудным телом измерить потенциал, то будет получен минимум. Интенсивность наблюдаемых над сульфидными телами естественных полей колеблется

в широких пределах — от первых десятков до нескольких сотен милливольт. Окислительно-восстановительные потенциалы образуются также на контактах пород, содержащих соединения металлов с разной степенью окисления. Возникновение двойного электрического слоя было замечено на контакте «зеленых» и «малиновых» глин Ферганской нефтеносной провинции. Положительные заряды слоя располагаются со стороны зеленых глин, содержащих соли закиси железа, отрицательные — со стороны «малиновых» глин, богатых окислами железа. В угольных пластах, содержащих неорганические включения (обычно сульфидные), при окислении углей и сульфидов кислородом поверхностных вод или бурового раствора возникает двойной электрический слой с расположением положительных зарядов со стороны угольного пласта. Наблюдаемые при этом отрицательные аномалии достигают сотен милливольт.

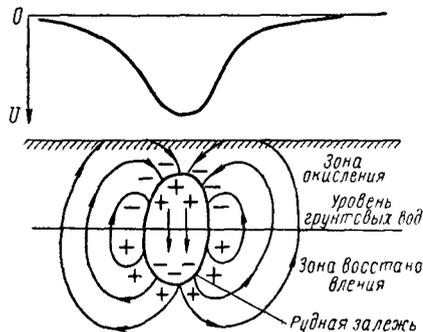


Рис. 64. Схема образования естественного поля сульфидной залежи

называется адсорбционной активностью. В порядке ее убывания горные породы располагаются следующим образом: глинистые сланцы, морские глины, плотные мергели, песчаные глины, глинистые песчаники, глинистые известняки и доломиты, слабо сцементированные песчаники, мелко- и крупнозернистые пески, рыхлые известняки и доломиты. Диффузионно-адсорбционные потенциалы резко колеблются по знаку и амплитуде в зависимости от водонасыщенности и состава соприкасающихся горных пород, концентрации и состава солей в воде и других причин. Для полевой электроразведки поля диффузионного происхождения значения не имеют. Они отчетливо наблюдаются только при электрокаротаже скважин.

Фильтрационные потенциалы возникают при прохождении электролита через пористую перегородку под давлением. Это ведет к механическому переносу жидкостью ионов подвижной части двойного диффузионного слоя и поэтому — к накоплению ионов различного знака по концам перегородки и возникновению разности потенциалов. Фильтрационная активность растет по мере увеличения пористости и проницаемости пород, уменьшения вязкости фильтрующего раствора, разности давлений. Фильтра-

ционные потенциалы наиболее интенсивно проявляются в условиях горного рельефа и в долинах рек. Возвышенности, в которых воды просачиваются через горные породы и стекают в пониженные части, имеют отрицательные потенциалы по отношению к долинам. При наблюдениях естественных полей, связанных с рудными телами, фильтрационные поля, накладываясь на них, становятся помехой. Рассмотрим формулы потенциала естественного поля над поляризованными телами простейшей формы.

Для сферы в произвольной точке дневной поверхности

$$U_P = -M \frac{h}{(x^2 + h^2)^{3/2}},$$

где h — глубина залегания центра сферы; x — текущая координата; M — коэффициент, зависящий от э. д. с. поляризации и удельного сопротивления тела и вмещающих пород.

Для горизонтального цилиндра

$$U_P = -M \frac{h}{(x^2 + h^2)}.$$

Для вертикального тонкого пласта

$$U_P = 2\lambda \ln \frac{(x^2 + h^2)^{1/2}}{(x^2 + H^2)^{1/2}},$$

где λ — плотность распределения зарядов на верхней и нижней границах пласта; h и H — глубины их залегания.

Приведенные формулы позволяют оценить характер естественного поля над реальными объектами и по результатам полевых наблюдений оценить параметры искомых объектов.

2. Методика полевых работ

Установка метода естественного поля состоит из двух заземлений M и N , соединенных проводами с измерительным прибором. Измерения выполняют обычно с помощью автокомпенсатора ЭСК при выключенном компенсаторе поляризации. Линия MN заземляется с помощью неполяризующихся электродов.

Неполяризующийся электрод состоит из керамического пористого сосуда, верхняя наружная часть которого глазирована и является изолятором, нижняя часть не глазирована и пористая. В сосуд наливают раствор медного купороса и помещают медный стержень, к которому подсоединяют провод. Медный купорос, проникая через пористые стенки сосуда, служит надежным контактом с почвой. У таких электродов их электродные потенциалы оказываются близкими по величине и постоянными во времени. Общая поляризация таких электродов оказывается незначительной и — что наиболее существенно — постоянной в процессе измерений. Это позволяет наблюдать естественные поля практически без искажений из-за поляризации электродов.

Перед началом работ на участке съемки готовят сеть наблюдений. С этой целью вдоль предполагаемого простирания изучаемого объекта прокладывают магистраль, а по нормали к ней — линии профилей с пикетами. Измерения естественного поля можно проводить двумя способами: съемкой потенциала и съемкой градиентов. Измерения выполняют обычно способом съемки потенциала и лишь в районах промышленных помех, когда работа с длинными линиями становится невозможной, применяют способ съемки градиентов.

При работе способом съемки потенциала (рис. 65, а) измерения проводят с перемещением только одного переднего электрода, подключаемого к клемме *M* прибора.

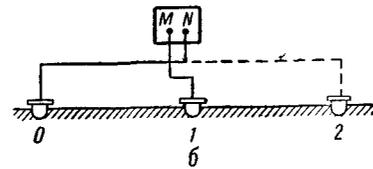
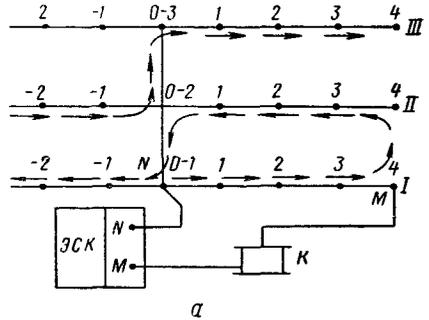


Рис. 65. Схемы наблюдений в методе естественного поля.
а — по способу съемки потенциала;
б — по способу съемки градиентов потенциала

Второй электрод присоединяют к клемме *N* и оставляют неподвижным на одной точке.

Полевые работы проводят в следующем порядке. Электрод *N* устанавливают на магистральном пикете *O* профиля *I*, рядом располагают измерительный прибор и катушку *K* с проводом. Электрод *M* ставят на точку *I* профиля *I* и с помощью прибора измеряют разность потенциалов между электродами *M* и *N*. Затем электрод *M* поочередно устанавливают на пикетах 2, 3 профиля *I*. После окончания замеров на первой половине профиля провод сматывают и в том же порядке проводят съемку на второй половине профиля. Закончив съемку профиля *I*, подвижный электрод устанавливают на точку *O* профиля *II* и измеряют ее потенциал относительно начальной точки профиля, увязывая тем самым профили *I* и *II*. Затем электрод *N* устанавливают в точке *O* профиля *II* и производят съемку профиля *II* в том же порядке. Электроды заземляют в небольшой лунке глубиной 5—8 см.

Каждый раз, когда подвижный электрод возвращается к месту стоянки прибора, измеряют поляризацию электродов, которая не должна быть более 1—2 мВ. Контрольные замеры выполняют на каждой пятой или десятой точке.

При съемке естественного поля способом градиентов в разности потенциалов измеряют между каждой смежной парой точек профиля.

Измерительный прибор устанавливают у точки *I* (рис. 65, б), электроды ставят на точках *O* и *I*. Задний электрод присоединяют к клемме *N* прибора, а передний — к клемме *M*. Затем измеряют разность потенциалов, после чего электроды переносят на следующий интервал. При этом можно либо переставлять одновременно оба электрода (передний электрод с точки *I* на точку 2, задний — с точки *O* на точку *I*); либо один только задний электрод через два интервала (с точки *O* на точку 2). Первая схема измерений менее удобна, так как поляризация во все измерения входит с одним знаком и поэтому ее необходимо систематически определять. При измерениях по второй схеме поляризация практически не сказывается на результатах измерений, так как входит то с одним, то с другим знаком. Достаточно следить за постоянством поляризации, производя ее замеры через 5—10 точек.

3. Обработка и интерпретация полевых материалов

Обработка материалов съемки заключается в вычислении потенциала или градиентов потенциала точек и в построении карт графиков или изолиний вычисленных величин.

В способе съемки потенциала в точках профиля *I* измеренные значения равны потенциалам точек стоянки электрода *M* относительно точки, где заземлен электрод *N*.

Чтобы определить потенциалы точек остальных профилей, сначала вычисляют опорные значения потенциала на магистральных пикетах по формуле

$$U^{0-2} = U^{0-1} + \Delta U_{MN},$$

где ΔU_{MN} — приращение потенциала в точке 0—2 по отношению к точке 0—1. Далее потенциал в точках профиля вычисляют по формулам

$$U_i = U^{0-1} + \Delta U_{MN} - \delta U_{\text{п}} \text{ профиль I,}$$

$$U_i = U^{0-2} + \Delta U_{MN} - \delta U_{\text{п}} \text{ профиль II,}$$

$$U_i = U^{0-3} + \Delta U_{MN} - \delta U_{\text{п}} \text{ профиль III,}$$

где ΔU_{MN} — результат измерений при стоянке электрода *N* в точке 0—2 (или 0—3) и электрода *M* в точке *i* данного профиля; $\delta U_{\text{п}}$ — поправка за поляризацию электродов.

В способе съемки градиентов по первой схеме принимают за положительный отсчет такое измерение, когда электрод *M* находится впереди *N* (при выбранном одинаковом направлении всех профилей) и переключатель полярности указывает знак «+». На каждой измеренной точке результату присваивают необходимый знак и получают величины $\Delta U_{i, i+1}^{\text{п}}$. После этого градиент потенциала в какой-либо точке вычисляют по формуле:

$$\Delta U_{i, i+1} = \Delta U_{i, i+1}^{\text{п}} - \delta U_{\text{п}}.$$

При наблюдении по второй схеме знаки измеренных величин разности потенциалов будут истинными, поэтому $\Delta U_{i,i+1} = \Delta U_{i,i+1}^{изм} - \delta U_n$, где $\Delta U_{i,i+1}^{изм}$ — измеренное значение между пикетами профиля i и $i+1$. Поправка δU_n вычисляется как среднее значение двух измерений поляризации, между которыми находится данная точка.

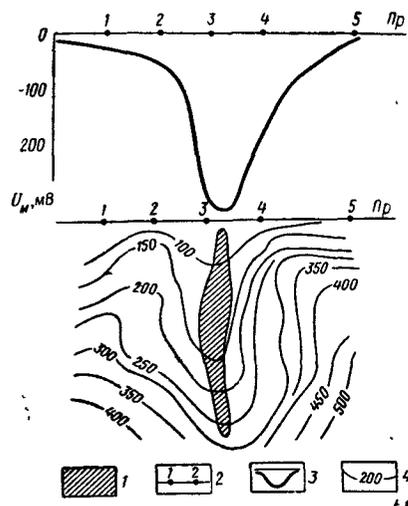


Рис. 66. График потенциала естественного поля и разрез кажущихся сопротивлений над медноколчеданым месторождением.

1 — контур медноколчеданной залежи в разрезе; 2 — точки ВЭЗ; 3 — график потенциала; 4 — изолинии ρ_k (в Ом·м)

Приняв потенциал магистральной точки профиля за нуль или определенную величину, можно по значениям градиентов вычислить относительный потенциал U_i остальных точек профиля по формуле:

$$U_i = U_{i-1} + \Delta U_{i-1,i}$$

где U_{i-1} — потенциал предыдущей точки (например, магистральной); $\Delta U_{i-1,i}$ — приращение потенциала последующей точки относительно предыдущей.

Если между магистральными и крайними точками соседних профилей выполнить увязочные наблюдения, то можно вычислить потенциал всех точек участка от единого уровня.

Результаты съемок изображают в виде планов графиков и планов изолиний равного потенциала или градиента потенциала (рис. 66).

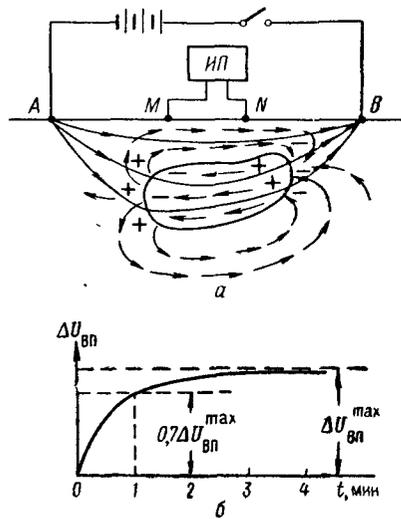


Рис. 67. Схема образования потенциалов вызванной поляризации (а) и график нарастания $\Delta U_{ВП}$ (б)

Интерпретация материалов съемки заключается в истолковании полученных карт и графиков потенциала. При интерпретации могут быть выполнены количественные расчеты по определению глубины залегания предполагаемого объекта, например сферы (изометричные аномалии) или горизонтального цилиндра (вытянутые аномалии). Глубину до центра сферы h определяют по формуле

$$h = 0,5d,$$

где d — расстояние между точками на кривой, где потенциал аномалии по абсолютной величине в 3 раза меньше экстремального значения.

Для цилиндра глубина залегания до центра h равна половине ширины экстремума на высоте, где потенциал аномалии в 2 раза меньше экстремального.

§ 43. МЕТОД ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Под действием электрического тока, пропускаемого через линию AB , в прилегающей к установке окружающей среде происходит электрохимический процесс, выражающийся в появлении в ней вторичных электродвижущих сил. Этот процесс называется вызванной поляризацией. После выключения тока в исследуемой среде еще некоторое время протекает электрический ток, поэтому между измерительными приборами MN наблюдается разность потенциалов. На ее измерениях и основан метод вызванной поляризации, известный под сокращенным названием метода ВП. Вызванная поляризация связана с возникновением двойных электрических слоев на границе твердых проводников и жидкости — электролита. Наиболее интенсивно процессы вызванной поляризации возникают при пропускании тока через электроннопроводящие объекты — рудные залежи, которые находятся во вмещающей ионопроводящей среде — горной породе, содержащей обычно в порах природную влагу. При пропускании через рудную залежь (рис. 67, а) электрического тока слой электролита приобретает положительный потенциал со стороны положительного питающего заземления и отрицательный потенциал — со стороны отрицательного заземления. Под влиянием создавшегося электростатического поля у поверхности залежи создается двойной электрический слой. Рудная залежь становится поляризованной. После выключения тока начинается разряд двойного слоя и восстановление нейтрального распределения ионов в электролите. Это вторичное поле, падающее в некоторый промежуток времени до нуля, и является полем вызванной поляризации, характеризуемое величиной $\Delta U_{ВП}$. Во время пропускания тока, кроме того, происходит деформация двойного электрического слоя, возникшего за счет электродных процессов до пропускания

тока. После выключения тока деформация исчезает в течение некоторого времени, что также является источником поля вызванной поляризации, увеличивая $\Delta U_{ВП}$.

Поскольку возникновение ВП связано с процессами на границе электронных проводников и электролита, то интенсивность поля ВП будет возрастать по мере увеличения суммарной поверхности электроннопроводящих частиц рудного объекта. Поэтому метод ВП более эффективен при выявлении вкрапленных руд, чем сплошных. Вкрапленные руды часто образуют ореол вокруг сплошного рудного тела, что создает благоприятные предпосылки для применения метода ВП с целью выявления глубокозалегающих сплошных залежей по ореолам вкрапленных руд.

В ионопроводящих объектах двойные электрические слои образуются за счет адсорбции ионов электролита (анионов) поверхностью минеральных частиц (катионов). Под влиянием поляризующего тока равновесие в пространственном распределении ионов разного знака (зарядов) в пределах двойного слоя нарушается. После выключения тока происходит восстановление равновесия двойного слоя, благодаря чему возникает спадающее во времени поле ВП.

Метод ВП имеет широкое применение при поисках месторождений меди, полиметаллов, графита и других полезных ископаемых, содержащих электроннопроводящие минералы.

Разность потенциалов вызванной поляризации $\Delta U_{ВП}$ зависит от времени пропускания тока или так называемой зарядки. Экспериментальными работами установлено, что график $\Delta U_{ВП}$ изменяется по экспоненциальному закону и приближается асимптотически к величине $\Delta U_{ВП}^{\max}$ (рис. 67, б). Практически в течение 3—5 мин величина $\Delta U_{ВП} \approx \Delta U_{ВП}^{\max}$. Величина $\Delta U_{ВП}$ при одномоментной зарядке составляет $0,7 U_{ВП}^{\max}$.

Отношение $(\Delta U_{ВП} / \Delta U_{MN}) \cdot 100$, где ΔU_{MN} — разность потенциалов, измеряемая между электродами MN при пропускании тока через электроды A и B , называется поляризуемостью среды. В условиях однородной среды оно характеризует ее истинную удельную поляризуемость η . В случае неоднородной среды это отношение называется кажущейся удельной поляризуемостью и обозначается η_k . При исследованиях по методу ВП применяется три основных режима возбуждения и измерения поля вызванной поляризации: 1) режим одиночных импульсов; 2) периодически-импульсный режим; 3) режим разнополярных импульсов.

Режим одиночных импульсов заключается в пропускании через питающую линию постоянного тока длительностью 3—5 мин и измерении разности потенциалов ВП в линии MN через 0,5 с после выключения тока. При этом измеряется или мгновенное значение $\Delta U_{ВП}$ с помощью импульсного вольтметра, или кривая

спада ее путем осциллографирования. Ввиду низкой производительности этот режим применяется редко и в основном для изучения процесса спада $\Delta U_{ВП}$.

При работе в периодически-импульсном режиме через электроды AB пропускают серию периодических импульсов одинаковой полярности, паузы между которыми равны или несколько меньше длительности импульсов. Измерительный прибор включают в каждую паузу в один и тот же момент времени и при помощи накопительной или инерционной ячейки определяют напряжение вызванной поляризации. В результате многократного поступления полезного сигнала в измерительное устройство происходит его накопление и тем самым относительная величина его по сравнению с хаотически меняющимися помехами растет.

Режим разнополярных импульсов заключается в подаче в питающую линию следующих один за другим импульсов тока разной полярности, паузы между которыми составляют не менее половины длительности импульсов. Этот режим обладает наибольшей защищенностью от низкочастотных помех и позволяет повысить точность измерений, особенно малых величин $\Delta U_{ВП}$.

Аппаратура имеет специальное устройство — реле времени, позволяющее подключать измерительный прибор к линии MN через один и тот же промежуток времени после выключения тока. Поскольку необходимо измерять мгновенное значение амплитуды $\Delta U_{ВП}$, то для этой цели применяют импульсные вольтметры. В станциях предусмотрена запись измеряемой величины на ленте осциллографа. В этом случае гальванометр осциллографа регистрирует полную кривую спада $\Delta U_{ВП}$ обычно в течение 1—3 мин. Величина $\Delta U_{ВП}$ незначительна по отношению к ΔU_{MN} , поэтому, чтобы измерить ее с большей точностью, для питания линии AB применяют токи большой величины (25—30 А), которые получают от генераторов. Для уменьшения общего сопротивления заземлений на концах питающей линии AB забивают по 50—100 электродов, которые соединяют с помощью антенного канатика и подключают к линии AB . Учитывая громоздкость установки, применяют такие схемы измерений, которые бы обеспечивали минимальное количество стоянок аппаратуры. Обычно наблюдения ведутся по схеме срединных градиентов и ВЭЗ. Размер линии AB выбирают равным 1—2 км. С одной стоянки наблюдают по несколько профилей (один основной и два — четыре параллельных ему), расположенных в интервале $1/3$ — $1/2$ длины AB . Для заземления приемной линии используют неполяризующиеся электроды.

Для работы по методу вызванной поляризации выпускают специальные станции ВП.

Станция ВПО-62 (облегченная) установлена на одной автомашине и состоит из генераторной установки, пульта управления генератором, измерительной панели. В комплект станции входят

катушки с проводом, два телефона и неполяризующиеся электроды.

Генераторная установка состоит из генератора переменного тока, вращение которого осуществляется от двигателя. Переменное напряжение выпрямляется полупроводниковым выпрямителем, на выходе которого создается регулируемое постоянное напряжение от 70 до 560 В. Генератор имеет две последовательно включенные лампы на 127 В по 100 Вт, которые служат балластным сопротивлением.

С помощью пульта управления генератором имеется возможность установить режимы длительной зарядки, периодически-импульсный и разнополярных импульсов. Сила тока измеряется амперметром, установленным также на пульте управления. В периодически импульсном режиме с помощью реле времени ток пропускают импульсами по 10 с с паузой 5 с.

Основными блоками измерительной панели являются автокомпенсатор и импульсный вольтметр. Автокомпенсатор применяется для измерения величины ΔU_{MN} , а также для усиления сигнала $\Delta U_{ВП}$. Импульсный вольтметр представляет собой усилитель постоянного тока прямого усиления со стрелочным индикатором на выходе. Предварительно усиленный в схеме автокомпенсатора сигнал $\Delta U_{ВП}$ с помощью реле времени на короткое время (0,1 с) подается на емкость, включенную в сеточную цепь импульсного вольтметра, и заряжает ее. Напряжение на емкости сохраняется на время, достаточное для взятия отсчета по стрелочному индикатору, а величина отсчета оказывается пропорциональной амплитудному значению измеряемого сигнала. Включение импульсного вольтметра через 0,5 с после выключения тока в цепи АВ обеспечивается специальной ячейкой задержки в цепи реле.

К выходу автокомпенсатора может быть подключен электропроводный осциллограф для регистрации кривой спада $\Delta U_{ВП}$. На панели управления имеются компенсатор поляризации, переключатели пределов измерений и градуировочное устройство для контроля чувствительности измерения величин $\Delta U_{пр}$ и $\Delta U_{ВП}$.

Станция ВПП-67 (переносная) применяется главным образом в труднодоступных районах. Она состоит из генератора переменного тока с бензоагрегатом, пульта управления, измерительного прибора с автопереключателем, выносного прибора для измерения тока, катушек с проводом, электродов и телефонов. Генераторная установка вырабатывает постоянное напряжение до 500 В при токе до 5 А. В качестве источника поляризующего тока могут быть применены батареи.

В пульте управления имеется прибор для измерения силы тока и система коммутации для создания трех режимов. Режим длительной зарядки задают вручную. Режимы периодически-импульсный и разнополярных импульсов задаются автоматически. Длительность импульсов тока может составлять 10 и 5 с при паузах соответственно 5 и 2,5 с.

Во время пропускания тока автопереключатель устанавливает высокую чувствительность измерительного прибора, а цепи его коммутируются для измерения ΔU_{MN} . В момент выключения тока автопереключатель устанавливает высокую чувствительность измерительного прибора, а цепи его коммутируются для измерения мгновенного значения $\Delta U_{ВП}$ через 0,5 с после выключения тока.

Выносной блок для измерения силы тока может применяться при работе с установкой комбинированного профилирования, когда измерительный прибор перемещается по профилю вдали от пульта управления.

Для работы в труднодоступных районах при небольшой мощности наносов предназначена малогабаритная переносная станция «Енисей». Она позволяет выполнять измерения в режимах длительной зарядки и однополярных П-образных импульсов частотой 11 Гц при токе до 0,25 А и напряжении до 400 В. Измерения $\Delta U_{ВП}$ производятся на ранних стадиях процесса: через 5, 15 и 30 мс после выключения тока. Благодаря этому измеренное значение $\Delta U_{ВП}$ повышается. При работе в импульсном режиме измерительное устройство автоматически подключается к линии MN в паузах между импульсами. Источниками поляризующего тока служат сухие батареи типа 100 АМЦГ-20. Максимальная величина разноса питающей линии не превышает первых сотен метров, что приводит к резкому снижению глубинности исследований.

Станция «Енисей» может применяться также для работы методом естественного поля.

Работы по методу ВП проводят в основном установками среднего градиента, ВЭЗ (установка АМNB) и комбинированного профилирования. Величину разносов и режимы работы выбирают в процессе опытных работ в пределах известных месторождений и рудопроявлений, а также на безрудных участках.

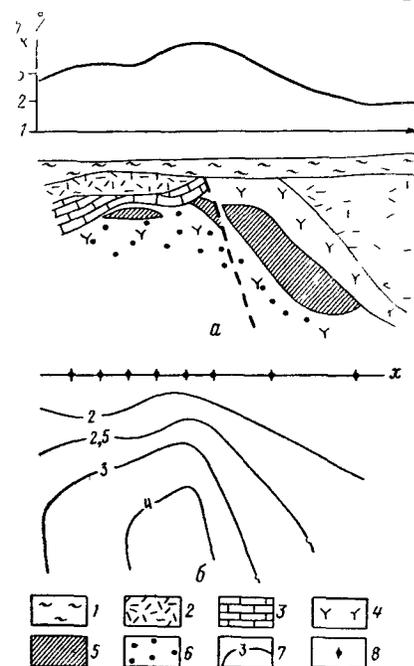


Рис. 68. График η_k (а) и вертикальный разрез ρ_k в ом-метрах (б) на медноколчеданном месторождении. 1 — рыхлые отложения, 2 — туфы смешанного состава, 3 — известняки, 4 — дациты, 5 — рудное тело, 6 — вкрапленная сульфидная минерализация, 7 — изолинии поляризуемости (%), 8 — точки ВЭЗ-ВП

На поисковом этапе ведут профильные или площадные наблюдения обычно с установкой срединного градиента. После обнаружения аномалий их детализируют по более густой сети, применяя также установку комбинированного профилирования. В пределах выявленных аномалий выполняют несколько наблюдений установкой ВЭЗ ВП для ориентировочной оценки глубины залегания и конфигурации поляризующегося объекта.

Результаты профилирования представляют в виде графиков η_k и карт графиков ρ_k (рис. 68). По наблюдениям с установкой ВЭЗ вычерчивают на билогарифмическом бланке кривые ВЭЗ ВП параметров η_k и ρ_k , строят вертикальные разрезы измеренных параметров (рис. 68, б).

Полученные материалы интерпретируются в основном качественно. По графикам η_k глубину $h_{ц}$ до центра изометричных объектов можно определить ориентировочно по ширине аномалии m на половине ее амплитуды по формуле $h_{ц} \approx 1,2 m$. Положение контакта пород различной поляризуемости устанавливают по средней точке участка кривой большого градиента η_k .

§ 44. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

1. Понятие о переменном электромагнитном поле

В электроразведке на переменном токе изучают гармонические и нестационарные электромагнитные поля.

Под гармоническим понимают такое поле, все элементы которого изменяются во времени t по закону косинуса или синуса (рис. 69):

$$M = M_0 \cos(\omega t + \varphi_M) \text{ или } M = M_0 \sin(\omega t + \varphi_M),$$

где M_0 — максимальное значение параметра M ; ω — круговая частота изменения поля, равная $2\pi f$ или $2\pi/T$ (f — частота тока, T — период колебаний); φ_M — начальная фаза при $t = 0$.

Электромагнитное гармоническое поле складывается из двух составляющих: электрической \vec{E} и магнитной \vec{H} (рис. 69). На значительном удалении от источника электромагнитных колебаний при распространении волны вдоль оси z векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны друг к другу и к оси z , т. е. расположены в плоскости, параллельной плоскости xOy . Такую волну называют плоской. По мере распространения волны вдоль оси z векторы совершают гармонические колебания с фазами, сдвинутыми на угол $\Delta\varphi$, называемым сдвигом фаз. Если в плоскостях, перпендикулярных к оси z , построить векторы \vec{E} и \vec{H} и проследить за их изменением вдоль оси z , то окажется, что за период колебаний каждый из векторов описывает эллипс. Проекции векторов \vec{E} и \vec{H} на оси x и y называются их составляющими и обозначаются E_x, E_y, H_x, H_y . В однородной изотропной среде

составляющие векторов \vec{E} и \vec{H} выражаются следующими уравнениями:

$$E_x = E_{x0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{x0}),$$

$$E_y = E_{y0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{y0}),$$

$$H_x = H_{x0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{x0} + \Delta\varphi),$$

$$H_y = H_{y0} e^{-bz} \cos(\omega t - az + \varphi_{y0} + \Delta\varphi),$$

где $E_{x0}, E_{y0}, H_{x0}, H_{y0}$ — максимальные значения соответствующих величин; φ_{x0} и φ_{y0} — начальные фазы составляющих E_{x0} и E_{y0} ; $\Delta\varphi$ — сдвиг фаз между электрической и магнитной составляющими; a и b — константы, зависящие от свойств среды.

Уравнения показывают, что затухание электромагнитного поля происходит по экспоненциальному закону, т. е. практически пропорционально величине e^{-bz} . Поэтому параметр b называют коэффициентом поглощения. Коэффициент поглощения b зависит от электрических свойств среды и частоты поля:

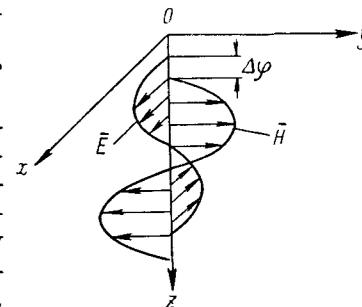


Рис. 69. Компоненты гармонического электромагнитного поля

$$b = \omega \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]}.$$

Формула показывает, что коэффициент поглощения растет с увеличением частоты поля, проводимости, электрической магнитной проницаемости.

В теории электромагнитного поля пользуются понятием «глубина проникновения поля» — расстояние, на котором вследствие поглощения амплитуда поля уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма). Установлено, что глубина проникновения электромагнитного поля с частотой 10 кГц в однородной среде с удельным сопротивлением 100 Ом·м равна 50 м. При снижении частоты вдвое глубина проникновения увеличивается до 70,5 м. Аргументы $\varphi_E = \omega t - az + \varphi$ и $\varphi_H = \omega t - az + \varphi + \Delta\varphi$ называют фазами волны, а коэффициент a — фазовой константой.

Фазовую константу определяют по формуле

$$a = \omega \sqrt{\varepsilon\mu} \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}.$$

Таким образом, параметр a также зависит от частоты поля и электрических свойств среды. Следовательно, по мере

распространения волны, наряду с ее поглощением, происходит изменение ее фазы по сравнению с первоначальной. Отношение компонент E_x/H_y (или E_y/H_x) называют импедансом, или волновым сопротивлением, и обозначают Z .

Известно, что $|Z| = \sqrt{\rho\omega\mu}$, следовательно, измеряя составляющие электромагнитного поля и определяя величину $|Z|$, можно судить по ней об удельном сопротивлении и магнитной проницаемости среды. В среде, где отсутствуют ферромагнитные минералы, изменение модуля импеданса при данной частоте поля практически определяется изменением удельного сопротивления среды. Решая систему уравнений относительно величины $\Delta\phi$, можно определить, что

$$\operatorname{tg}(\Delta\phi) = \frac{a}{b}.$$

Таким образом, измеряя сдвиг фаз $\Delta\phi$ между величинами \vec{E} и \vec{H} , можно судить о поглощающих свойствах среды.

В ряде методов электроразведки наблюдают нестационарные электромагнитные поля, создаваемые как заземленными, так и незаземленными источниками, ток в которых меняется ступенчато. Характер нестационарных полей существенно зависит от строения геоэлектрического разреза. Зависимость таких полей от времени t удобно описывать переходными характеристиками вида

$$A = f(t),$$

где A — наблюдаемый элемент поля (электрическая или магнитная составляющая, плотность тока и т. д.).

2. Способы создания и измерения переменных и нестационарных электромагнитных полей и принципы измерения электрической и магнитной составляющих напряженности поля

Переменные электромагнитные поля в электроразведке создают двумя способами: гальваническим и индуктивным. В гальваническом способе переменный ток от источника поступает в землю через заземленные электроды A и B (рис. 70, a). Однако по сравнению с методами постоянного тока рассматриваемые способы имеют существенные отличия. Дело в том, что переменное магнитное поле тока в линии AB индуцирует в земле вторичный ток, и в толще пород возникает сложное токовое поле, являющееся результатом наложения токов, созданных в земле и гальваническим, и индуктивным способами. Магнитная составляющая результирующего поля также является суммой магнитных полей тока в линии AB и в земле.

Индуктивный способ заключается в том, что на дневной поверхности устанавливают одновитковую или многовитковую рамку или раскладывают большой контур — петлю (рис. 70, $b, в$). Пропускаемый через них переменный ток своим

переменным магнитным полем индуцирует в толще пород вторичный электрический ток. И в этом случае наблюдаемое магнитное поле является суммой магнитного поля тока в рамке (петле) и тока в земле. В радиоволновых методах замкнутая рамка заменяется открытым контуром — излучающей антенной.

Указанная рамка, питаемая переменным током, создает в точках, находящихся на расстояниях, значительно превышающих ее диаметр, переменное магнитное поле, совпадающее с полем гармонически меняющегося магнитного диполя. Если плоскость рамки вертикальна, то ее поле эквивалентно полю горизонтального магнитного диполя; поле горизонтальной рамки отвечает полю вертикального магнитного диполя.

Электрическая составляющая переменного электромагнитного поля измеряется как и в методах постоянного поля посредством измерительных линий, состоящих из двух заземлений M и N , к которым подключается измерительное устройство (например, микровольтметр). Измеренная разность потенциалов, отнесенная к разносу MN , дает приближенное значение напряженности поля E в центре отрезка MN .

Магнитная составляющая измеряется индукционным способом с помощью приемных рамок, аналогичных возбуждающим. О величине составляющей H судят по величине напряжения, индуцируемого измеряемым полем в контуре рамки. Рассмотрим рис. 70, a . Вектор напряженности \vec{H}_0 магнитного поля направлен по касательной к магнитным силовым линиям. Величина и направление вектора в точке O изменяются с течением времени по синусоидальному закону в соответствии с изменением амплитуды \vec{E}_0 и направления электрического тока в линии AB . Предположим, что закон изменения магнитной составляющей поля \vec{H} в точке O_1 выражается формулой

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \cos \omega t,$$

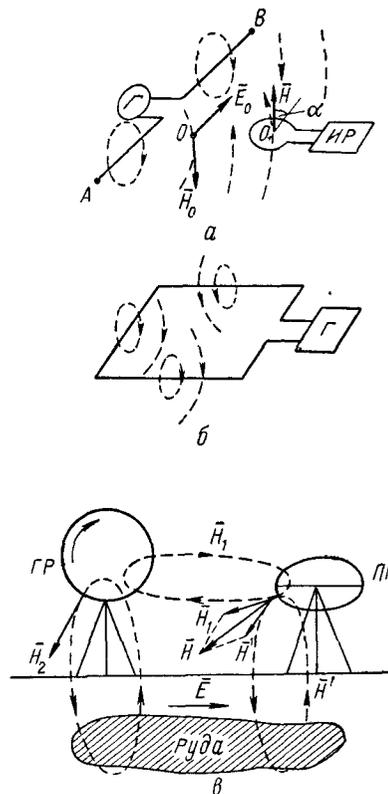


Рис. 70. Способы создания электромагнитного поля
 a — гальванический; $б$ — индуктивный; $в$ — магнитных диполей

где t — время; ω — угловая частота изменения поля; \bar{H}_0 — амплитудное значение магнитного поля.

Если в точку O_1 поместить плоскую рамку, содержащую s витков провода, угол между плоскостью которой и вектором \bar{H} равен α , то в витках рамки будет возникать переменная э. д. с., определяемая по формуле

$$\bar{E} = \bar{H}_0 s \omega \sin \alpha \cos(\omega t - 90^\circ).$$

Таким образом, величина э. д. с. пропорциональна амплитудному значению вектора магнитного поля, количеству витков рамки, частоте поля и зависит от угла между вектором \bar{H}_0 и плоскостью рамки. Фаза вектора \bar{E} отстает от фазы вектора \bar{H} на 90° . Для получения максимального сигнала в рамке необходимо при данном числе витков и частоте тока увеличивать угол α до 90° , т. е. ориентировать плоскость рамки перпендикулярно к вектору \bar{H} . Если плоскость рамки параллельна вектору \bar{H} , то $\sin \alpha = 0$ и $E = 0$. Таким образом, меняя ориентировку рамки в пространстве, можно по максимальному или минимальному отсчету определить направление вектора \bar{H} и измерить его амплитуду. Индуктивные способы возбуждения и измерения электромагнитных полей в электроразведке имеют принципиальные преимущества, позволяя не только расширить область применения методов, но и обходиться без заземлений, что очень важно при работе зимой, а также в горных районах на каменных осыпях и обнажениях.

В случае высокоомного разреза магнитная составляющая суммарного поля в основном определяется магнитным полем тока в линии AB (или в рамке). С усложнением геоэлектрического разреза за счет появления в нем хорошо проводящих тел, все большую роль приобретают составляющие, обусловленные вторичными токами, индуцированными в проводящих телах. Это отражается на структуре и интенсивности поля. На этом и основывается геологическое применение методов переменных токов.

Рассмотрим рис. 70, в. В точке наблюдения, где установлена приемная рамка PP , измеряемое суммарное магнитное поле \bar{H} складывается из составляющей \bar{H}_1 поля питающей рамки GP и составляющей \bar{H}' магнитного поля токов, индуцированных полем рамки GP в рудном теле. Чем больше размеры и выше электропроводность тела, тем больше составляющая \bar{H}' и тем значительно изменяется суммарный вектор \bar{H} в сравнении с нормальным полем \bar{H}_1 питающей рамки. Это отражается и на амплитудном значении напряжения, наведенного в рамке PP , и на ее положении при измерении этого напряжения.

Индуктивный способ измерения магнитного поля можно подразделить на абсолютный и относительный. В первом случае измеряют полное амплитудное значение вектора и фазы или

только его фазу. Во втором случае определяют отношения амплитуд и разности фаз одной из компонент поля между двумя точками или эти же величины для двух взаимно перпендикулярных составляющих вектора в точке.

Нестационарные поля возбуждают либо единичным импульсом тока в питающем устройстве, либо серией импульсов. Нестационарное поле (так называемый переходный процесс) наблюдают после каждого импульса. Периодическое следование импульсов позволяет использовать накопление полезных сигналов и тем самым повышать как чувствительность, так и помехозащищенность измерительного устройства. А поскольку нестационарное поле является тоже меняющимся полем, то для его измерений удобнее всего использовать индукционный способ.

§ 45. МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

1. Общие сведения

Мощные потоки заряженных частиц, поступающих от Солнца в сторону Земли, вызывают изменения (вариации) ее магнитного поля. В ионосфере Земли возникают токовые вихри, под воздействием которых в земной коре и мантии образуется естественное электромагнитное поле, называемое магнитотеллурическим. На изучении особенностей его распространения в земной коре и основаны магнитотеллурические методы разведки. Магнитотеллурическое поле имеет сложный характер. В нем выделяются непериодические возмущения, а также гармонические составляющие, характеризующиеся довольно устойчивыми периодами от долей секунд до десятков минут.

На основе изучения вариаций магнитного поля возникли методы вариационной разведки (МВР). Поле электрической составляющей E получило название теллурического. В результате изучения особенностей его изменения во времени возник метод теллурических токов (МТТ). Благодаря одновременному изучению электрической и магнитной составляющих поля были созданы методы магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и профилирования (МТП), а также комбинированного магнитотеллурического профилирования, объединяющего методы МТП и МТТ. Магнитотеллурическое поле, имея очень низкую частоту, проникает в глубь Земли на десятки и сотни километров, поэтому магнитотеллурические методы являются самыми глубинными.

В магнитотеллурических методах изучают короткопериодные и длиннопериодные колебания поля. К короткопериодным относят колебания с периодом от долей секунд до нескольких минут, которые делятся на устойчивые и неустойчивые (или иррегулярные). Устойчивые колебания имеют квазисинусоидальную форму с периодом T от единиц до сотен секунд и общую продолжительность проявления 5—8 ч. Они наблюдаются практически ежедневно в утренние и дневные

часы. Неустойчивые колебания наблюдаются значительно реже, в основном в вечерние и ночные часы, и обладают периодом 40—80 с.

Интенсивность короткопериодных колебаний поля примерно в 2 раза выше летом, чем зимой. Она возрастает при повышении солнечной активности и с увеличением широты пунктов наблюдения. В среднем напряженность теллурических полей в средних широтах изменяется от 0,1 до 10 мВ/км, а магнитных — от 0,1 до 10 гамм.

С течением времени векторы напряженностей \vec{E} и \vec{H} в данной точке меняют величину и направление. Если в некоторые моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 измерить и построить векторы, а затем концы их соединить плавной линией, то эта линия будет называться соответственно годографом E или H . Если годограф вытянут по какой-либо линии или близок по конфигурации к кругу или эллипсу, то говорят соответственно о линейной, круговой и эллиптической поляризации поля.

Длиннопериодные вариации — это одиночные импульсы, период которых достигает нескольких часов. Их изучают при глубинных исследованиях.

В магнитотеллурических методах наблюдения на точке выполняют при ориентировке двух измерительных линий MN (или осей двух магнитометров) по двум взаимно перпендикулярным направлениям, чаще всего по меридиану и широте. В результате этого получают составляющие E_x, E_y, H_x и H_y .

В магнитотеллурическом профилировании изучают составляющие векторов \vec{H} и \vec{E} поля некоторой постоянной частоты. Это позволяет определять импеданс, который называют в х о д н ы м и м п е д а н с о м или в о л н о в ы м с о п р о т и в л е н и е м разреза.

В случае однородной среды по измеренному на поверхности земли входному импедансу можно определить удельное сопротивление ρ по формуле

$$\rho = 0,2T [Z]^2, \quad (23)$$

где T — период колебаний составляющих \vec{E} и \vec{H} , по которым вычислена величина Z .

Если изучаемая среда неоднородна, величина, вычисленная по этой формуле, называется кажущимся сопротивлением и обозначается

$$\rho_T = 0,2T [Z]^2. \quad (24)$$

В магнитотеллурическом зондировании изучают поле на различных частотах, что позволяет построить кривые зависимости входного импеданса $Z = f(\sqrt{T})$, которые называют кривыми магнитотеллурического зондирования.

Для двух- и трехслойных разрезов с различными параметрами h и ρ слоев рассчитаны и построены теоретические кривые МТЗ,

которые применяются для количественной интерпретации наблюдаемых кривых МТЗ.

В методе теллурических токов величины E_x и E_y измеряют одновременно на двух станциях — базисной и рядовой. Это дает возможность вычислить так называемый теллурупараметр μ :

$$\mu = \frac{E_{xp}}{E_{xb}} = \frac{E_{yp}}{E_{yb}},$$

где E_{xb}, E_{yb} — составляющие поля на базисной станции; E_{xp}, E_{yp} — составляющие поля на рядовой станции.

Установлено, что для двуслойного разреза, где удельное сопротивление второго слоя (опорного горизонта) бесконечно велико, величина теллурупараметра определяется отношением продольных проводимостей горных пород надопорной толщи в базисной S_b и рядовой S_p точках:

$$\mu = \frac{S_p}{S_b}.$$

Таким образом, при неподвижной базисной точке и перемещаемой по исследуемой площади рядовой точке имеется возможность по величине теллурупараметра определить продольную проводимость S_p в рядовых точках в долях этой величины на базисной точке.

Магнитотеллурические методы позволяют изучать глубинные геоэлектрические разрезы при наличии в надопорной толще непроводящих экранов, поскольку последние не являются препятствием для электромагнитной волны. В этом их главное преимущество перед методом сопротивлений на постоянном токе. Другое преимущество их заключается в том, что при работе не требуется применять питающих линий и генераторных установок, что повышает производительность труда и снижает стоимость работ.

2. Аппаратура магнитотеллурических методов

Для работы магнитотеллурическими методами применяются магнитотеллурические лаборатории МТЛ-62, МТЛ-63, МТЛ-71. Магнитотеллурическая лаборатория МТЛ-62 предназначена для работ методами магнитотеллурического профилирования, магнитной вариационной разведки, магнитотеллурического зондирования и методом теллурических токов. В комплект лаборатории входят осциллограф ЭПО-8 (с барабанной приставкой) или ЭПО-9, два магнитометра МЭ-1, пульт управления, два усилителя Т-1, радиостанция РПМС (или РСО-3) с блоком питания, телевключатель ТВ-8 или ТВ-9 (последний используется с радиостанцией РСО-3), контрольные кольца Гельмгольца, пульт эталонирования и вспомогательное оборудование. Аппаратура монтируется в кузове автомашины. Каждый прибор является отдельным, легко

снимаемым блоком, и весь комплект может транспортироваться в случае бездорожья различными транспортными средствами.

Магнитометры МЭ-1 предназначены для преобразования вариаций горизонтальных составляющих H_x и H_y магнитного поля в колебания электрического напряжения. Чувствительным элементом магнитометра МЭ-1 (рис. 71, а) является магнит-индикатор 1 с зеркальцем 2, укрепленный на кварцевой нити 3. Кварцевая нить крепится на кварцевой дуге 4 и установлена в вертикальном положении. На зеркальце 2 поступает луч света от осветителя 5. Отразившись от зеркальца, луч света падает на фотоэлемент 6.

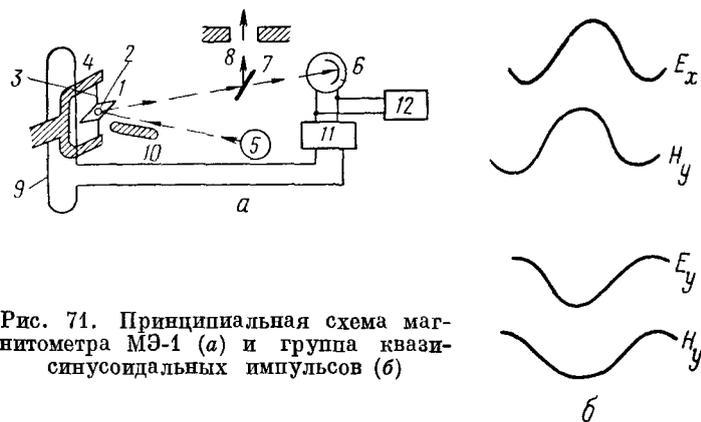


Рис. 71. Принципиальная схема магнитометра МЭ-1 (а) и группа квазисинусоидальных импульсов (б)

Часть света от зеркальца магнита-индикатора с помощью наклонного зеркала 7 падает в смотровое окно 8, которое служит для визуального контроля за положением магнита-индикатора и освещенности катода фотоэлемента.

В магнитометре имеются компенсационный магнит 10 и четыре обмотки: демпферная, обратной связи по магнитному полю, градуировочная и обмотка дополнительной компенсации постоянной составляющей магнитного поля. Каждая обмотка образует магнитную систему типа вертикальных колец Гельмгольца, в центре которой помещается магнит-индикатор. При пропускании через обмотку тока создается однородное магнитное поле, которое стремится повернуть магнит-индикатор вокруг вертикальной оси, закручивая кварцевую нить. Действие суммарного магнитного поля, создаваемого обмотками, уравновешивается упругими силами кварцевой нити.

Принцип работы магнитометра МЭ-1 заключается в следующем. Перед началом наблюдения на точке с помощью компенсационного магнита 10 (грубо) и путем изменения величины тока в обмотке дополнительной компенсации постоянной составляющей магнитного поля (точно) магнит-индикатор 1 устанавливают в такое положение, чтобы освещенность катода фотоэлемента 6 была минимальна. Под действием вариации измеряемой величины

H_x или H_y магнит-индикатор стремится повернуться вокруг вертикальной оси 3 на определенный угол. Вместе с магнитом поворачивается зеркальце 2, вследствие чего освещенность катода фотоэлемента увеличивается. В цепи фотоэлемента возникает ток, пропорциональный площади освещения катода. С помощью электронной схемы 11 прибора ток усиливается и подается в обмотку 9 обратной связи по магнитному полю, с помощью которой на чувствительный элемент начинает действовать магнитное поле, поворачивая магнит-индикатор в первоначальное положение. Таким образом, положение магнит-индикатора остается неизменным, а величина тока в анодной цепи меняется пропорционально изменению измеряемой компоненты магнитного поля. Напряжение, снимаемое с сопротивления анодной цепи фотоэлемента, подается на гальванометр осциллографа 12, отклонение рамки которого (и соответственно блика на фотобумаге) пропорционально изменению величины H_x или H_y магнитного поля.

Демпферная обмотка служит для устранения высокочастотных колебаний магнита-индикатора. Она действует как обмотка обратной связи. Градуировочная обмотка необходима для градуировки показаний магнитометра. Градуировка выполняется путем пропускания через обмотку тока $I_{гр}$ известной величины и отсчета амплитуды отклонения блика $l_{гр}$ гальванометра. Постоянная обмотки f , выраженная в гаммах на 1 мА, для каждого магнитометра указана в паспорте прибора. Произведение $I_{гр} f$ дает величину магнитного поля $H_{гр}$ в гаммах, действующего на магнит-индикатор. Цена одного миллиметра m отклонения блика гальванометра в гаммах рассчитывается по формуле

$$m = \frac{\overline{H}_{гр}}{l_{гр}} = \frac{I_{гр} f}{l_{гр}}.$$

Градуировка выполняется перед началом и после измерений на точке, что обеспечивает необходимую точность измерений, независимо от возможного изменения чувствительности магнита-индикатора под действием температуры, деформации нити и других факторов.

В рабочем положении ось вращения магнита-индикатора устанавливают в вертикальное положение с помощью круглого уровня, расположенного на корпусе прибора.

На корпусе прибора имеется гнездо для съемной буссоли, с помощью которой плоскость, проходящая через магнит-индикатор и кварцевую нить, устанавливают перпендикулярно к вектору измеряемой компоненты магнитного поля. На корпус прибора нанесена стрелка — указатель полярности, служащая для ориентировки магнитометра.

Осциллограф ЭПО-8 имеет четыре измерительных канала для измерения величин H_x , H_y , E_x , E_y . В каждом из каналов E_x и E_y имеются компенсаторы постоянного напряжения (КПН) для грубой

и плавной компенсаций э. д. с. поляризации электродов в пределах 450 мВ, переключатели чувствительности электрических каналов (от 75 до 4 мм/мВ без усилителя или от 200 до 6 мм/мВ с усилителем при сопротивлении приемной линии 10 кОм). В каждом из каналов H_x и H_y установлены компенсаторы постоянного напряжения (КПН) для смещения нулевой линии гальванометров, компенсаторы постоянного магнитного поля, переключатели пределов измерения, с помощью которых чувствительность магнитного канала может регулироваться в пределах от 200 до 0,5 мм/гамм.

В осциллографе имеется градуировочное устройство, представляющее собой потенциометрический делитель, с секций которого снимаются известные напряжения (0,25—25 мВ или 0,25—25 гамм) и посылаются в цепь гальванометров каналов E_x и E_y или в градуировочные обмотки магнитометров.

Усилитель Т-1 предназначен для усиления электрических напряжений в каналах E_x и E_y . В усилителях использован принцип электромеханического преобразования входного напряжения в пульсирующее с частотой 190 Гц, с последующим его усилением и синхронным выпрямлением на выходе.

Радиостанция РПМС (или РСО-3) служит для связи с базисной установкой при работе по методу теллурических токов и может работать в телефонном и телеграфном режимах. Телевключатель ТВ-8 (или ТВ-9) совместно с радиостанцией РПМС (РСО-3) позволяет при работе методом ТТ наносить марки времени на одной установке и передавать (или принимать) сигналы для нанесения таких же марок на другой, удаленной установке. Телевключатель обеспечивает три режима работы радиостанции: а) обычную радиосвязь между операторами полевой и базисной станций; б) нанесение марок времени на осциллограмму своей установки и передачу этих же марок для синхронного их нанесения на осциллограмму другой работающей установки; в) прием марок времени передающей радиостанции для синхронного нанесения их на осциллограмму своей установки.

В отличие от станции МТЛ-62, в станции типа МТЛ-63 магнитные датчики подвешены на металлических растяжках. Кроме того, в комплекте станции имеется дополнительный магнитометр для измерения вариаций вертикальной составляющей магнитного поля H_z .

3. Методика, обработка и интерпретация результатов полевых наблюдений

Перед началом работ выполняют эталонирование магнитометров и проверку идентичности измерительных каналов. Эталонирование магнитометров выполняют с помощью колец Гельмгольца, определяя цену миллиметра отклонения блика гальванометра на фотобумаге в гаммах.

Идентичность каналов E_x и E_y проверяют путем регистрации электрических колебаний при параллельно включенных приемных

линиях, а идентичность каналов H_x и H_y — путем регистрации вариаций магнитного поля при параллельно установленных магнитометрах. Идентичность каналов считается допустимой, если расхождения в амплитудах записей двух каналов не превышает 3%, сдвиг фаз — не более 5% и относительное сползание нуля — не более 0,03 мВ/мин и 0,05 гамм/мин.

В магнитотеллурическом профилировании и зондировании применяются прямоугольные измерительные установки, состоящие из двух заземленных приемных линий (E_x и E_y) и двух магнитометров (H_x и H_y). Приемные линии составляющих E_x и E_y подключаются к осциллографу. В районах с высоким переходным сопротивлением между пультом управления и осциллографом включают усилители. Магнитометры подключают к пульту управления.

Провода приемных линий E_x и E_y растягиваются по падению и простираются изучаемого опорного горизонта, перпендикулярно к осям и параллельно осям вытянутых структур, линиям разломов и т. д. В районах с устойчивой квазилинейной поляризацией поля одну из линий E_x или E_y ориентируют по направлению оси поляризации. Азимут осей x и y намечается по буссоли с погрешностью до $\pm 0,5^\circ$. За ось x принимается ось, которая ближе к широтному направлению, а за y — ось, которая ближе к меридиональному направлению. Провода приемных линий чаще всего раскладываются в виде буквы Г, но могут применяться Т-образная или крестообразная установки. Длина линий составляет 0,3—0,5 (в районах с высокой теллурической активностью и однородным поверхностным покровом) или 0,8—1 км (в районах с низкой теллурической активностью и с неоднородным поверхностным покровом). Расстояние между ближними приемными заземлениями линий E_x и E_y устанавливается не менее 10—20 м.

Перед началом измерений величин блики гальванометров выводят с помощью КПН на визуальную шкалу. Чувствительность каналов и скорость протяжки ленты выбирают таким образом, чтобы средняя амплитуда вариаций и их периоды соответствовали на фотобумаге расстояниям 30—40 мм.

Перед началом и в конце записи в каналы посылают градуировочные импульсы длительностью 10 с и такой величины, чтобы отклонения бликов составляли 30—60 мм.

Продолжительность записи вариаций теллурического и магнитного полей зависит от характера и интенсивности вариаций магнитотеллурического поля. В методе МТП продолжительность записи составляет 1,5 ч и обычно содержит 8—10 групп квазисинусоидальных импульсов E_x , E_y , H_x и H_y с различной поляризацией поля и периода от 10 до 80 с. В методе МТЗ запись многократно повторяют в течение от 5 до 50 ч с целью получения колебания с равномерным распределением периодов в интервале 10—1000 с ($T = 1; 2; 5; 8; 10; 15; 25; 40; 60; 80; 100; 300; 500$ с). Каждому периоду соответствует не менее двух — четырех групп

квазисинусоидальных импульсов, характеризующихся различной поляризацией поля.

В методе теллурических токов составляющие E_x и E_y синхронно измеряют в базисном и рядовом пунктах. Рядовые точки размещают по профилям или равномерно по изучаемой площади. Расстояния между точками меняются от 0,2 до 10 км в зависимости от масштаба съемки. Одновременно работают три-четыре станции, одна из которых остается на базисном пункте, остальные ведут съемку на рядовых точках. Синхронная запись обеспечивается путем подачи марок времени с базисного пункта на рядовые с помощью радиостанций и телевключателей. Азимуты приемных линий на рядовых и базисных пунктах одинаковые. Расстояния между рядовым и базисным пунктами оставляют от 30 км (в сложных геологических условиях) до 100 км (в районах со спокойным залеганием слоев).

Обработка результатов наблюдений магнитотеллурическими методами начинается с выделения квазисинусоидальных импульсов, определения их амплитуды и периода (рис. 71, б). Период импульса определяют по маркам времени, а амплитуду в милливольт-секундах или в гаммах путем сравнения их с градуировочными импульсами.

В методах МТП и МТЗ выделяют группы квазисинусоидальных импульсов (рис. 71, б), соответствующие друг другу во времени, периоды которых различаются не более, чем на 10—15%, а фазы сдвинуты не более, чем на $1/15$ периода. Амплитуда импульсов должна составлять на осциллограмме не менее 10 мм. Средний период для каждой группы импульсов определяют по формуле

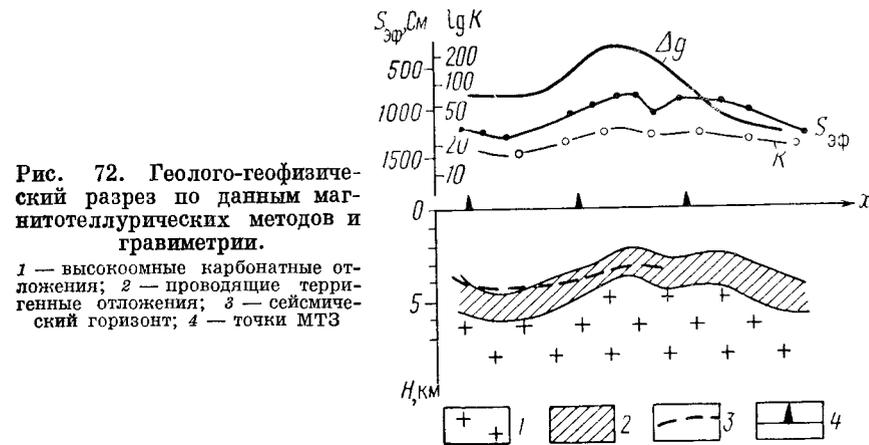
$$T = \frac{1}{4} (T_{E_x} + T_{E_y} + T_{H_x} + T_{H_y}).$$

Для каждой группы выделенных импульсов можно определить величину входного импеданса Z и по формуле (24) — значение ρ_T . Поскольку периоды (и соответственно частота) разных групп импульсов различны, то полученные величины ρ_T будут зависеть от удельного сопротивления геoeлектрического разреза на различных глубинах. Затем для всех групп импульсов определяют модуль эффективного импеданса $|Z_{\text{эф}}|$. Способы его определения описаны в специальной литературе и в данной книге не рассматриваются. Зная величину $|Z_{\text{эф}}|$, вычисляют эффективную продольную проводимость надпорной толщи $S_{\text{эф}}$. Если удельное сопротивление ρ_n опорного горизонта слишком велико, то $S_{\text{эф}} = 796 / |Z_{\text{эф}}|$. По значениям $S_{\text{эф}}$ строят графики и карты изолиний, которые дают представление о структуре исследуемого района. Зная среднее продольное сопротивление ρ_l надпорной толщи, можно определить глубину h до опорного горизонта по формуле:

$$h = \rho_l S_{\text{эф}}.$$

При изучении поверхности фундамента, поисках нефтегазоносных структур с углами наклона не более $5-10^\circ$ и незначительном изменении ρ_l по площади карты $S_{\text{эф}}$ отчетливо отражают рельеф поверхности высокоомного фундамента (рис. 72).

В методе МТЗ для каждой группы квазисинусоидальных импульсов вычисляют ρ_T по формуле (24), затем на блогогарифмическом бланке строят кривые МТЗ, которые интерпретируют путем сравнения их с теоретическими кривыми МТЗ. При интерпретации по двуслойным теоретическим кривым полевая кривая совмещается с одной из теоретических, крест палетки переносится



на бланк полевой кривой. Ордината креста определяет сопротивление первого слоя ρ_1 , а абсцисса определяет значение $\sqrt{T_1}$. Зная T_1 и ρ_1 , можно определить h_1 (в км):

$$h_1 = \sqrt{\frac{10\rho_1 T_1}{8}}.$$

По модулю μ теоретической кривой определяют удельное сопротивление второго слоя $\rho_2 = \mu\rho_1$. После аналогичного совмещения двуслойных фазовых полевой и теоретической кривых абсцисса креста палетки позволяет определить h_1 , а модуль $\mu = \rho_2/\rho_1$ дает возможность узнать ρ_2 при условии, что величина ρ_1 известна, например по данным интерпретации амплитудной кривой.

Трехслойные кривые МТЗ интерпретируют по специальным альбомам теоретических трехслойных кривых подобно тому, как это выполняется в методе ВЭЗ. При этом определяют величины $\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1$ и h_2 . По результатам интерпретации можно построить такие же геoeлектрические разрезы, что и по методу ВЭЗ. Таким образом, метод МТЗ дает значительно больший материал по сравнению с методами МТП. Комплексируя последний с небольшим

объемом точек МТЗ, можно более полно интерпретировать результаты магнитотеллурического профилирования.

Результаты наблюдений метода теллурических токов представляют в виде теллурограмм — записей изменения разностей потенциалов между электродами M и N базисной $E_{xб}$ и $E_{yб}$ и рядовой E_{xp} и E_{yp} станций. При обработке сравнивают записи, полученные базисной и рядовой станциями. Наиболее простым способом сравнения является способ треугольников. Он заключается в построении векторных диаграмм по величинам $\Delta E_x = E_{xб} - E_{xp}$ и $\Delta E_y = E_{yб}$. Для каждого фиксированного момента времени определяют суммарный вектор вариаций как диагональ прямоугольника, построенного на составляющих вариаций по осям x и y . Далее суммарные синхронные векторы вариаций на базисной и рядовых точках группируются в пары. По каждой паре строят треугольник и вычисляют полученные площади. Среднее значение из отношений площадей синхронных рядовых и базисных треугольников равно квадрату величины параметра K . Таким образом,

$$K = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \frac{S_{ip}}{S_{ib}}},$$

где n — число пар треугольников; S_{ip} и S_{ib} — площади синхронных треугольников на рядовом и базисном пунктах.

По результатам метода ТТ строят графики и карты изолиний теллуropараметра μ , который при наличии опорного горизонта характеризует отношение S_b/S_p . Поскольку $S = H/\rho_l$, то максимумам K соответствуют поднятия, а минимумам — прогибы опорного горизонта (рис. 72).

§ 46. МЕТОД ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Метод переходных процессов (МПП) применяется для поисков рудных проводящих объектов и основан на изучении переходного процесса после пропускания через питающую линию П-образных импульсов длительностью в несколько миллисекунд. После подачи импульса тока в питающую линию (незаземленную петлю, включается приемная линия, где с помощью измерительного прибора исследуют характер изменения переходного процесса в интервале от 0 до 0,1 с.

Если поблизости питающего устройства находится проводящий объект, то после выключения тока в нем индуцируются вихревые токи, которые в первоначальный момент возникают на его поверхности, а затем распространяются к его центру, постоянно затухая. Затухание происходит за счет тепловых потерь, которые увеличиваются с ростом удельного сопротивления объекта. Таким образом, чем больше его проводимость, тем медленнее в нем происходит затухание. Интенсивность индуцированных токов растет

с увеличением проводимости и размеров проводящих включений. Расчеты и моделирование показывают, что вихревые токи в рыхлых отложениях и окружающих низкоомных породах исчезают значительно быстрее (через 1—10 мс), чем в рудных телах высокой электропроводности (через 10—20 с).

Работы методом переходных процессов применяются в наземном, скважинном и воздушном вариантах.

Наземные работы выполняются рамочно-петлевой и однопетлевой установками (рис. 73). В рамочно-петлевой установке первичное поле возбуждается с помощью большой незаземленной прямоугольной петли со сторонами от нескольких сотен метров до

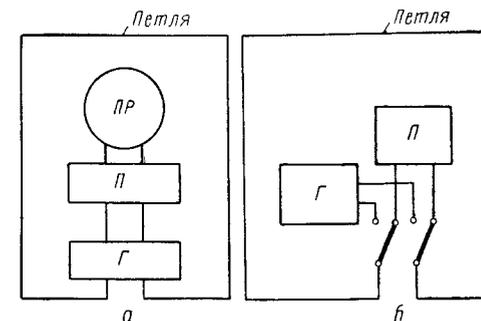


Рис. 73. Рамочно-петлевая (а) и однопетлевая (б) установки метода переходных процессов. П — приемник, Г — генератор, ПР — приемная рамка

1—2 км, которая раскладывается на дневной поверхности. Поле переходного процесса измеряют с помощью приемной рамки ПР, которую перемещают по профилям в центральной части петли. Приемную рамку устанавливают горизонтально.

В однопетлевой установке первичное поле возбуждают незаземленной петлей со сторонами от нескольких десятков до первых сотен метров. Поле переходного процесса измеряют с помощью той же петли, которая автоматически в необходимый момент времени с выхода генератора Г переключается на вход измерительного прибора П. Однопетлевая установка позволяет в результате одного измерения получить информацию о геоэлектрическом разрезе в пределах большой площади, околупетлевой, что определяет ее высокую производительность на поисковом этапе. Рамочно-петлевая установка характеризуется значительно меньшим охватом исследуемой площади за одно измерение, но позволяет более детально изучить особенности поля переходных процессов. Поэтому она применяется на этапе детализации.

Аппаратура МПП-3 позволяет работать как с рамочно-петлевой, так и однопетлевой установками. Она состоит из измерительно-генераторного блока, двух усилителей мощностью 90 и 1200 Вт, приемной рамки, катушек с проводом для раскладки небольших петель, катушек с кабелем для монтирования петель больших размеров, комплекса кабелей, бензоэлектрического агрегата, аккумуляторов.

Генератор мощностью 3 Вт, имеющийся в измерительно-генераторном блоке, применяется для питания петель небольших размеров (со стороной квадрата в несколько десятков метров). Для питания петель со стороной до 1000 м используется усилитель мощностью на 90 Вт, а для питания петель, сторона которых достигает нескольких километров, применяют усилитель мощностью на 1200 Вт.

Ток в питающую петлю подается П-образными импульсами, длительностью 20 и 40 мс.

После прохождения каждого импульса петля (или измерительная рамка) автоматически подключается к усилителю измерительного прибора, импульсы переходного процесса усиливаются и поступают на блок задержки. Он вырезает из усиленного импульса ординату кривой переходного процесса в заданный момент времени t_x . Импульсные вырезанные значения напряжения поступают на накопительную емкость. Поскольку поступление сигнала продолжается несколько сот периодов, накопительная емкость заряжается до амплитудного значения $E(t_x)$. К емкости подключен милливольтметр, измеряющий постоянное значение напряжения, равное $E(t_x)$. Его делят на силу тока питающих импульсов, получая отношение $E(t_x)/I$, которое называют с о б с т в е н н ы м и м п е д а н с о м п е т л и. Аппаратура МПП-3 позволяет измерять его в следующие моменты времени t_x после прохождения питающего импульса: 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; 12; 16; 24; 32 и 40 мс.

На поисковом этапе наблюдение методом переходных процессов ведется с однопетлевой установкой, имеющей размеры петли, в 2—3 раза превышающие глубину залегания рудных тел (от нескольких десятков до первых сотен метров). Исследуемую площадь сплошь покрывают системой петель. Импеданс измеряют при двух-трех величинах t_x .

Детальную съемку выполняют на участках аномалий с рамочно-петлевой установкой в масштабах 1 : 5000—1 : 10 000. Питающую петлю раскладывают таким образом, чтобы аномалия находилась посередине петли. На отдельных интерпретационных профилях во всех точках измеряют поле переходного процесса на нескольких временах с целью построения переходной характеристики. Измеряют вертикальную и горизонтальную составляющие импеданса.

Результаты работ представляют в виде графиков, карт графиков импедансов для разных времен t_x и кривых изменения импеданса (переходные характеристики) в зависимости от величины t_x на аномалиях (рис. 74).

Карты ранних времен содержат суммарное влияние объектов различной проводимости. Карты и графики поздних времен t_x (10—15 мс и более) отражают в основном влияние наиболее проводящих объектов (предположительно рудных тел). Более точная оценка природы аномалий выполняется по кривым $E(t_x)/I = f(t_x)$.

Глубина залегания объектов, близких к сферической или цилиндрической форме, примерно равна ширине аномалии на половине ее максимальной интенсивности. Крутопадающие пласты большого падения фиксируются минимумом над его эпицентром и двумя максимумами по краям. Глубина верхней кромки примерно равна половине расстояния между положительными экстремумами, полученными на средних временах.

Если на аномалии выполнены измерения с петлями различных размеров, то глубина до центра объекта примерно равна 1/3 стороны петли, с которой получено максимальное значение $E(t)/I$.

Аппаратура МППУ позволяет выполнять работу методом переходных процессов с однопетлевой установкой в наземном и рамочно-петлевой установкой в наземном и скважинном вариантах. Приемная рамка для наземных исследований представляет собой ферритовый стержень с обмоткой, помещенный на кардановом подвесе в защитный корпус, который устанавливается на поворотном столике треноги. Сигналы, поступающие в рамку, предварительно усиливаются, затем измеряются индикаторным блоком. Скважинная рамка (ферритовый стержень с обмоткой) диаметром 50 мм с предварительным усилителем размещены в герметизированной трубе из стеклопластика. Один конец трубы снабжен коротажной муфтой для присоединения к трехжильному кабелю, по которому усиленные сигналы подаются на индикаторный блок.

В воздушном варианте первичное импульсно-периодическое электромагнитное поле возбуждается при помощи генераторного контура, жестко укрепленного на вертолете. Поле переходных процессов измеряется с помощью измерительной рамки, которая буксируется на тросе в специальной гондole на некотором удалении

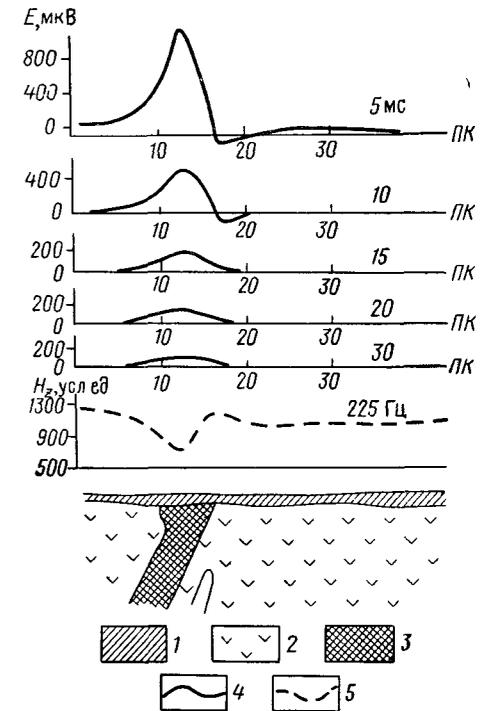


Рис. 74. Результаты работ методом МПП и индуктивным профилированием на многоколчеданном месторождении.

1 — наносы, 2 — вулканы, 3 — руда 4 — графики переходного процесса 5 — график вертикальной составляющей магнитной компоненты электромагнитного поля

от вертолета. В аппаратуре имеется устройство для компенсации помех, наводимых в измерительной рамке вихревыми токами в корпусе вертолета, возникающими в моменты выключения тока в генераторной рамке (поле переходного процесса вертолета).

§ 47. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

1. Частотное электромагнитное зондирование

Частотное электромагнитное зондирование — это метод разведки, основанный на изучении переменного электромагнитного гармонически меняющегося поля. Источником переменного электромагнитного поля является электрический диполь AB , питаемый генератором синусоидального тока. В точке, находящейся на постоянном расстоянии от диполя, значительно большем, чем AB , исследуют зависимость электрической и магнитной компонент поля диполя от частоты.

Глубина проникновения электромагнитного поля в Землю растет с уменьшением его частоты. Поэтому поле этого диполя, создающего большую частоту, зависит от строения верхней части геоэлектрического разреза. По мере уменьшения частоты на характер наблюдаемого поля оказывают влияние более глубокие горизонты разреза. Кривая зависимости элементов поля электрического диполя от частоты характеризует изменение геоэлектрического разреза с глубиной.

Таким образом, уменьшение частоты приводит к тому же эффекту, что и увеличение расстояния между источником поля и точкой измерения при зондировании на постоянном токе. Поэтому частотное зондирование решает те же задачи, что и метод ВЭЗ. Оно применяется для изучения геоэлектрических разрезов с горизонтальными или пологими слоями.

Однако частотное зондирование имеет преимущество по сравнению с методом ВЭЗ на постоянном токе, которое заключается в отсутствии громоздкой установки с проводами и электродами, высокой производительности и удобстве измерений. Другое преимущество определяется возможностью изучения геоэлектрического разреза под высокоомными экранирующими слоями. И, наконец, частотное зондирование позволяет получить большую информацию о разрезе на основе изучения магнитной составляющей поля, а иногда и характера изменения фазы измеряемого поля в зависимости от частоты.

Для изучения небольших глубин (от 10 до 300 м) применяется станция непрерывного частотного зондирования НЧЗ-64. Станция смонтирована на автомашине и состоит из генераторной I и измерительной II установок (рис. 75). Во время измерений они располагаются на заданном расстоянии (разносе) r .

В генераторной установке переменное синусоидальное напряжение, частота которого плавно меняется (от 60 Гц до 11 кГц),

поступает с задающего генератора 3 через усилитель мощности 1 в питающий диполь AB . В цепи его включено эталонное сопротивление R_0 , благодаря которому регистратор 4 типа Н-349 записывает в процессе измерения кривую изменения тока. Стрелочный прибор 5 позволяет визуально контролировать силу тока в диполе AB . В цепь регистрации тока включено градуировочное приспособление 6 для записи шкалы отсчета силы тока. Блок питания 2 генераторной установки состоит из батареи аккумуляторов или бензоагрегата с зарядно-распределительным устройством.

Индукционное электромагнитное поле с меняющейся частотой регистрируется измерительным устройством станции. Электрическая составляющая вектора электромагнитного поля E измеряется с помощью диполя MN , магнитная вертикальная составляющая H_z — с помощью магнитного диполя S , выполненного из нескольких витков изолированного провода. Измеряемая разность потенциалов ΔU_E или ΔU_H усиливается широкополосным усилителем 7 , записывается регистратором 9 и визуально наблюдается по стрелочному прибору 10 . В цепь диполей включено градуировочное устройство 11 , с помощью которого на регистратор можно подать градуировочное напряжение от 5 до 500 мкВ. Источником питания электрической схемы измерительной установки служит блок 8 сухих элементов.

Величина разноса между питающим и приемным диполями должна превышать глубину разведки в 3—6 раз. Точка записи относится к середине установки. Полевые работы обычно выполняют с дипольно-экваториальной установкой.

По результатам наблюдений вычисляют для разных частот кажущееся сопротивление по формуле

$$\rho_{\omega} = K \left(\frac{\Delta U}{I} \right),$$

где K — коэффициент установки, зависящий от размеров петли и диполя, числа витков в петле; ΔU — э. д. с. в датчике электрического или магнитного поля, мкВ; I — сила тока в питающем диполе, А.

Далее строят на билогарифмическом бланке кривые зондирования — графики зависимости кажущегося сопротивления ρ_{ω} от величины $\sqrt{T} = 1/\sqrt{f}$. Количественная интерпретация кривых ЧЗ выполняется путем сравнения их с теоретическими

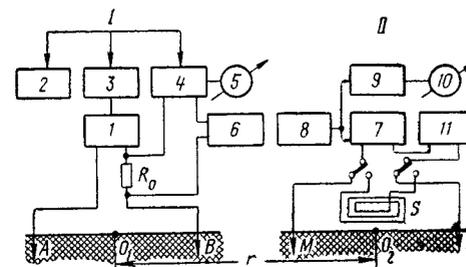


Рис. 75. Блок-схема станции НЧЗ-64

частотными кривыми электромагнитного зондирования аналогично тому, как это делается в методе МТЗ.

Для исследования больших глубин применяют станции других типов, имеющие более низкочастотный рабочий диапазон.

2. Зондирование становлением электромагнитного поля

Зондирование становлением электромагнитного поля (ЗСП) основано на изучении нестационарного электромагнитного поля, возбуждаемого электрическим диполем. В методе ЗСП применяется обычно такая же установка, что и при частотном зондировании.

При пропускании через диполь AB постоянного тока в окружающей его среде возникает постоянное магнитное поле. После выключения тока оно, изменяясь от некоторой величины до нуля, индуцирует вторичные электрические токи. В начальные моменты времени они распространяются в приповерхностной части разреза, затем проникают вглубь. Таким образом, зависимость электромагнитного поля от времени на ранних стадиях развития переходного процесса определяется строением верхних горизонтов разреза, а на поздних стадиях — строением глубинной части разреза. По решаемым задачам метод ЗСП аналогичен методу частотного зондирования.

Для работы по методу ЗСП применяют после небольших изменений обычную аппаратуру (ЭРСУ-61) для зондирования на постоянном токе изменений. Она должна обеспечивать возможность возбуждения первичного постоянного поля, ступенчатое его изменение в различные моменты времени и регистрацию переходного процесса в течение нескольких десятков секунд.

Сигналы переходного процесса с выходов датчиков усиливаются и записываются на осциллографе ЭПО-6 или ЭПО-7 при скорости протяжки бумаги 0,5—1,5 см/с. Для нанесения марок времени, синхронизированных с моментом прерывания тока в питающем диполе, используют приемно-передающие радиостанции.

В зависимости от разброса различают зондирование в дальней и ближней зонах. При зондировании в дальней зоне разнос установки обычно в несколько раз превышает глубину залегания опорного горизонта. При зондировании в ближней зоне разнос близок к глубине залегания опорного горизонта.

На точке записывают обычно 15—20 рабочих и градуировочных разнополярных импульсов длительностью до 100—200 с.

На полученных осциллограммах определяют для каждого импульса величину записанного напряжения $\Delta U(t)$ в различные определенные промежутки времени. Значение $\Delta U(t)$ осредняют и вычисляют величины кажущегося сопротивления $\rho_{\tau} = K [\Delta U(t)/I]$. Далее строят кривые ЗСП, откладывая в логарифмическом масштабе по оси ординат ρ_{τ} , а по оси абсцисс $\sqrt{2\pi t}$.

Количественная интерпретация полученных кривых ЗСП осуществляется путем сравнения их с теоретическими палочными кривыми.

§ 48. ИНДУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ

Методы электроразведки, в которых электромагнитное поле создается с помощью незаземленных контуров, обтекаемых переменным током, называют и н д у к т и в н ы м и. Контурами обычно являются рамки малых размеров, большие прямоугольные петли, очень длинные кабели. Электромагнитное поле (обычно магнитную составляющую) измеряют с помощью незаземленной рамки в ближней зоне, т. е. на расстоянии от источника, меньшем длины волны. Работы ведут в наземном, скважинном и воздушном вариантах. Изучают абсолютные и относительные изменения амплитудно-фазовых характеристик магнитного поля.

Первичное электромагнитное поле контура индуцирует в проводящем геоэлектрическом разрезе вихревые токи, интенсивность которых определяется электрическими свойствами разреза, типом и расположением питающего контура. Вихревые электрические токи создают в проводящих слоях горных пород, например в рудных залежах, магнитные поля, которые, накладываясь на первичное поле незаземленного контура, являются источниками наблюдаемых аномалий.

1. Наземные индуктивные методы

В наземном варианте используются методы незаземленной петли (НП), бесконечно длинного кабеля (БДК) и дипольного профилирования (ДИП). В методе НП первичное поле создается прямоугольной незаземленной петлей. В методе БДК для создания поля применяется длинный прямолинейный кабель, заземленный на концах. В дипольном профилировании источником первичного поля служит магнитный диполь — многовитковая рамка диаметром около 1 м, обтекаемая переменным током.

Для питания контуров, возбуждающих переменные поля, применяются генераторы переменного тока, работающие на сухих батареях, аккумуляторах или от бензоагрегатов. Генераторы вырабатывают ток нескольких стабилизированных частот.

Например, унифицированный электроразведочный генератор УЭГ-300 мощностью 300 Вт имеет рабочие частоты 19,5; 39; 78; 156; 312; 625; 1250; 2500; 5000; 20 000 Гц.

Основным элементом его является кварцевый генератор с триггерными делителями частоты, что позволяет получать высокую стабильность частоты сигнала, управляющего выходным каскадом генератора. Генератор УЭГ-300 применяется в методах ДИП, НП и БДК. С помощью блока согласующих трансформаторов производится согласование выходного сопротивления генератора

с сопротивлением нагрузки. Величина выходного тока в нагрузке контролируется специальным прибором.

В методах НП и БДК генератор устанавливается на точке. Его питание в этом случае осуществляется от сети постоянного тока напряжением 110 В или от аккумуляторов. В методе ДИП генератор переносится по профилям. В этом случае он питается от аккумуляторов СЦМ-15 или батарей типа 69-ГРМЦ-6, 29-ГРМЦ-13.

Рабочая частота генератора во многом зависит от глубины залегания проводящего объекта. Установлено, что с повышением частоты уменьшается глубинность разведки, поскольку увеличивается поглощение поля в земной коре. Оптимальную частоту выбирают опытным путем на участках известного залегания искомого проводящего объекта, например, в пределах известных рудных месторождений. При поисках колчеданных и других рудных залежей работы проводят с частотой 200—400 Гц. При наличии в районе поисков хорошо проводящих покровных отложений для работы применяют дополнительно вторую частоту, которая в 2—3 раза превышает принятую для обнаружения рудных тел.

Наблюдения методом НП проводят по профилям, расположенным внутри ее (иногда за ее пределами) и ориентированным перпендикулярно к длинной стороне петли. Измеряют обычно амплитуду и фазу или только амплитуду вертикальной составляющей H_z магнитного поля. Эти же параметры поля изучают в методе БДК. Магнитное поле кабеля изучают вдоль профилей, ориентированных перпендикулярно к кабелю или параллельно ему на таком участке, где магнитное поле токов, введенных в землю через заземление, практически бы не сказывалось на результатах измерения магнитного поля тока, текущего в кабеле.

В дипольном профилировании (ДИП) магнитное поле изучают при помощи приемной рамки (измерительного диполя). Оба диполя в процессе наблюдений перемещают по профилю без изменения взаимного положения.

При полевых работах индуктивными методами применяются абсолютные и относительные способы измерения магнитного поля. Измерения проще производить абсолютными способами, при которых определяют амплитуду и фазу, либо только амплитуду или фазу различных составляющих вектора магнитного поля в точке измерений.

Для измерений составляющих магнитного поля широко применяется измеритель магнитной амплитуды ИМА.

Датчиком магнитного поля является измерительная рамка — индукционная катушка, надетая на ферритовый сердечник. Под действием переменного магнитного поля в катушке возбуждается напряжение, пропорциональное проекции вектора напряженности на направление продольной оси катушки. Это позволяет определять различные составляющие переменного магнитного поля. Напряжение усиливается широкополосными усилителями,

после чего выпрямляется амплитудным детектором и измеряется стрелочным индикатором.

Для определения положения составляющих вектора в пространстве датчик установлен на столике, где он может поворачиваться в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Угломерное устройство дает возможность отсчитывать азимут и угол наклона продольной оси датчика к горизонту. Нивелировка столика производится с помощью винтов по круглым уровням. Для определения чувствительности датчика прибор снабжен градуировочной катушкой, которая надевается на датчик, и калиброванный сигнал поступает на измерительный прибор.

Для измерения величины H_z рамку устанавливают в вертикальном положении. Для измерения величины H_x рамку ориентируют по оси профиля в горизонтальном положении. Из этого положения рамку поворачивают на 90° по часовой стрелке вокруг вертикальной оси и берут отсчет величины H_y . Для измерения угла между полной горизонтальной составляющей ($H_r = H_x + H_y$) и составляющей H_x столик поворачивают по часовой стрелке вокруг вертикальной оси до получения минимального отсчета и по горизонтальному лимбу определяют полученный угол φ . Из этого положения рамку поворачивают вокруг вертикальной оси на 90° , а затем — вокруг горизонтальной оси до получения минимального отсчета (плоскость витков наклона параллельна вектору \vec{H}) и измеряют угол α отклонения вектора \vec{H} от вертикали. Поворачивая рамку вокруг горизонтальной оси на 90° , определяют полное значение вектора магнитного поля.

По результатам наблюдений методами НП, ДК и ДИП строят графики измеряемых параметров по профилям и выполняют качественную и количественную интерпретацию параметров залегания изучаемых объектов. На рис. 74 изображен график H_z над сульфидной залежью. В методе ДИП проводящие изометричной формы объекты при $h/L = 0,3$ (L — расстояние между генератором и приемником) выделяются минимумами величин H_z , H_y , φ_2 . При $h/L = 0,1$ в центре минимума появляется интенсивный максимум. Измеряя ширину минимума d , можно определить глубину до центра объектов по формуле

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 - d^2}.$$

При относительных измерениях определяют отношение амплитуд или фаз составляющих магнитного поля в двух точках исследуемой площади или в одной и той же точке, определяют отношение измеренной амплитуды к опорной величине, но для двух пространственных составляющих. Для относительных измерений не требуется высокой точности стабилизации тока в питающей цепи.

Для относительных измерений применяют афиметр (амплитудно-фазовый измеритель) АФИ-4, который содержит измерительный пульт, два выносных усилителя, две приемные рамки.

Приемная рамка представляет собой катушку индуктивности, намотанную на алюминиевое кольцо диаметром 0,5 м. На рамке имеется уровень для установки ее в горизонтальное положение, визирное приспособление, с помощью которого она ориентируется вдоль профиля. Для измерения вертикальной составляющей H_z поля плоскость рамки устанавливается горизонтально, для измерения горизонтальных составляющих H_x или H_y — вертикально. Вообще плоскость ее ориентируется перпендикулярно к измеряемой составляющей.

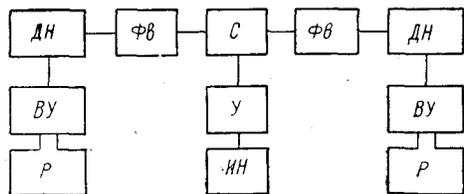


Рис. 76. Блок-схема аппаратуры АФИ-4

ВУ, расположенными около рамок, градуированные в децибеллах делители напряжения ДН (рис. 76). В них уравнивают амплитуды сигналов в обеих рамках. С делителей напряжения сигналы поступают на градуированные в градусах фазовращатели Фв, с помощью которых изменяют фазы сигналов без изменения амплитуды. С помощью фазовращателей сдвиг по фазе сигналов доводят до 180° . Далее с выхода сигналы смешиваются на сумматоре С, усиливаются на усилителе У и подаются на выход стрелочного индикатора нуля ИИ. Поскольку сигналы на сумматоре имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на 180° , индикатор нуля отмечает это положение нулевым показанием.

По шкалам делителя напряжений определяют отношение амплитуд поля, а по шкалам фазовращателей — сдвиг фаз.

Полевые работы индуктивными методами включают два этапа: поисковый и детализационный. Поисковые работы выполняют в масштабах от 1 : 5000 до 1 : 25 000 на двух частотах: одна частота (меньшая) применяется для обнаружения глубинных проводящих объектов (рудных залежей), другая (большая) для оценки влияния покровных отложений. Детализация выполняется в более крупных масштабах с целью более точного оконтуривания выявленных аномалий составляющих магнитного поля, а также определение природы аномалии. При детализации аномалий методом ИП участок ее помещают в центре петли, где электрическое поле минимально вследствие того, что составляющие поля токов, текущих через противоположные стороны петли, компенсируют

друг друга. Детальную съемку выполняют на нескольких частотах.

По результатам поисковых и детальных работ строят графики и карты графиков измеряемых составляющих магнитного поля. По графикам выполняют качественную интерпретацию, которая заключается в выявлении и оконтуривании аномальных зон и сопоставлении их с геологическими данными.

По результатам многочастотных наблюдений строят на билотарифмическом бланке частотную характеристику амплитуды аномального поля: зависимость отношения $(H_a/H_0) \cdot 100$ от частоты, где H_a — амплитуда аномального поля; H_0 — амплитуда нормального поля на участке. Сравнивая полученную зависимость с теоретическими кривыми, судят о природе аномалии (рудной или связанной с неоднородностью вмещающих или покровных образований). В методе ДИП рассчитаны номограммы, позволяющие по измеренным значениям H_z , H_y , α и по известным величинам разброса и частоты определять ρ_k . В этом случае по данным, полученным методом ДИП, можно построить графики и карты кажущегося сопротивления.

2. Воздушные индуктивные методы

Индуктивные методы электроразведки применяются также в воздушном варианте. Наибольшее применение нашли методы БДК, ДИП и магнитного вращающегося поля (МВП).

При методе БДК на поверхности земли раскладывают кабель длиной 20—30 км. Работа выполняется с помощью аппаратуры АЭРА, которая состоит из генераторной установки, смонтированной на автомашине и измерительной установки, смонтированной на вертолете МИ-4. В генераторную установку входят генератор, устройство для контроля опорной фазы, радиостанция для передачи опорного сигнала и для связи с оператором измерительной установки, а также передвижная электростанция ЖЭС-9.

На выходном устройстве генератора вырабатывается переменный ток с фиксированными частотами 81, 244, 976, 3904 Гц. Величина тока выходного устройства регистрируется самописцем, на ленте которого, кроме того, через каждые 30 с отмечаются марки времени. С выходного устройства снимается напряжение на схему контроля опорной фазы. С ее выхода передатчик подает в эфир сигналы — высокочастотные колебания тех же частот и фаз, что и питающий ток в линии АВ.

Измерительная установка состоит из приемной рамки (катушки с ферритовым сердечником), измерительного блока и радиостанции для связи и приема опорного сигнала от передатчика генератора установки. Приемная рамка с предварительным усилителем буксируется в гондоле на тросе-кабеле или крепится на его хвостовой балке. Принятый рамкой и предварительно усиленный сигнал направляется по кабелю в избирательный усилитель

и после него — в фазочувствительные детекторы измерения амплитуды и фазы. Величина амплитуды записывается регистратором МС-0,1.

Рамка принимает также сигнал опорной фазы, который усиливается и поступает на фазовращатель и далее — на фазочувствительный детектор измерения фазы, в котором с помощью автокомпенсационной схемы происходит уравнивание фаз опорного и измеряемого сигналов, а компенсационное напряжение, пропорциональное разности фаз, записывается также на регистраторе

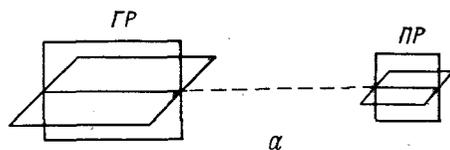
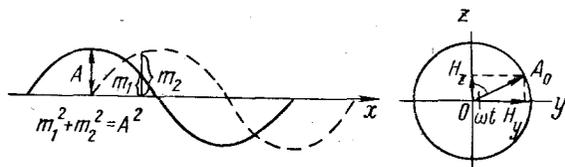


Рис. 77. Расположение рамок при методе вращающегося электрического поля (МВП)

МС-0,1. На ленте фиксируются марки времени, синхронные с марками времени на СК-100. Питание станции осуществляется от бортовой сети вертолета.

Съемка проводится в масштабах 1 : 10 000 и 1 : 100 000 на высоте полета 50—100 м со скоростью 70—100 км/ч по маршрутам, расстояние между которыми составляет 100—1000 м. При решении поисково-картировочных задач применяются высокие частоты (976 и 3904 Гц), при поисках рудных объектов повышенной проводимости — низкие частоты (81 и 244 Гц). Для контроля

Рис. 78. Схема образования вращающегося электрического поля



стабильности работы аппаратуры перед началом и после рабочего дня выполняются наблюдения на контрольном маршруте длиной 3—6 км. Аэроэлектрограммы вручную или с помощью счетно-решающих устройств перестраиваются в графики амплитуды H_y и фазы φ_y .

По графикам выполняют качественную интерпретацию.

При методе магнитного вращающегося поля электромагнитное поле создается с помощью генераторной рамки $ГР$, установленной на самолете (рис. 77). Магнитная составляющая поля измеряется с помощью приемной рамки $ПР$, которая расположена на другом самолете или в выносной гондоле.

На фюзеляже самолета генераторной установки укреплены две взаимно перпендикулярные рамки одинакового размера (рис. 77).

По рамкам текут токи одинаковой частоты и силы, но сдвинутые по фазе на 90° . В соответствии с рис. 78, в любой точке оси x

$$H_x = A_0 \cos \omega t, \quad H_y = A_0 \sin \omega t,$$

$$H_x^2 + H_y^2 = A_0^2,$$

$$H_{zoy} = A_0 (\cos \omega t + \sin \omega t),$$

где A_0 — амплитуда вектора магнитного поля.

Эти уравнения показывают, что величина модуля суммарного вектора в плоскости zOy в любой точке x остается постоянной и равной A_0 . Векторная величина изменяется по закону $\cos \omega t + \sin \omega t$. Так, при

$$\omega t = 0 \quad \cos \omega t + \sin \omega t = 1,$$

$$\omega t = \pi/2 \quad \cos \omega t + \sin \omega t = 1,$$

$$\omega t = \pi \quad \cos \omega t + \sin \omega t = -1,$$

$$\omega t = 3\pi/2 \quad \cos \omega t + \sin \omega t = -1.$$

Таким образом, суммарный вектор $A_0 = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ описывает в течение периода 2π окружности, т. е. поляризация поля круговая.

Генераторная установка для питания передающей рамки состоит из задающего генератора, фазовращателя и двух идентичных усилителей и устройства для контроля круговой поляризации. Задающий генератор имеет кварцевую стабилизацию и вырабатывает напряжение частотой 9800 Гц, с помощью магнитных делителей можно получить три рабочие частоты: 2450, 1225 и 612,5 Гц. Напряжение необходимой частоты подается на предварительный усилитель первого канала и одновременно на вращатель. С выхода его напряжение с измененной фазой на 90° поступает в предварительный усилитель второго канала. После усиления оба напряжения подключаются к генераторным рамкам. С помощью блока регулировки и контроля круговой поляризации имеется возможность уравнивать и измерять амплитуды тока в обеих рамках, а также контролировать фазовый сдвиг, равный 90° .

Измеряемые сигналы воспринимаются двумя аналогичными взаимно перпендикулярными рамками, ось пересечения которых совпадает с направлением оси генераторных рамок и движения самолета. Под действием первичного поля в рамках наводятся э. д. с., одинаковые по амплитуде, но сдвинутые по фазе на 90° . В приемном устройстве одно из напряжений U_z поворачивается по фазе на 90° , а затем вычисляется из второго U_y . Так как сдвиг фаз между ними устанавливается равным 180° , то результирующий сигнал от первичного поля равен нулю. Вторичное поле, обусловленное проводящими объектами под самолетом, создает в рамках напряжение разбаланса $\Delta U = U_y - U_z$, пропорциональное

величине магнитной составляющей индуцированного поля. В измерительном устройстве имеется счетно-решающая схема, позволяющая записывать на регистраторе так называемый амплитудный параметр $A_0 = 2|U_y| - |U_z| / (|U_y| + |U_z|)$ и сдвиг фазы $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_z$.

Питание измерительной и генераторной установок аппаратуры осуществляется от бортсети самолета с помощью полупроводниковых преобразователей.

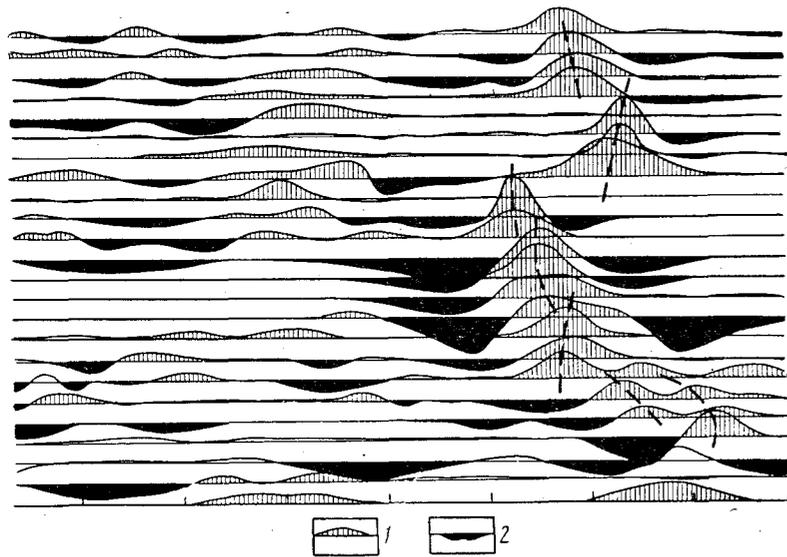


Рис. 79. Результаты электроразведки методом БДК.

1 — максимумы амплитудного параметра; 2 — максимумы фазового параметра

Съемка выполняется с помощью двух самолетов. На одном из них расположены генераторные рамки, а в выпускной gondole второго самолета — приемные рамки. Gondola выпускается с помощью буксирующего трос-кабеля посредством лебедки. Расстояние между центрами генераторной и приемной рамок выдерживается от 100 до 400 м, высота полета от 50 до 200 м. Привязка маршрутов производится штурманом по ориентирам или с помощью аэрофотографирования.

По данным съемки строят вручную или с помощью дешифраторов карты профилей, на которых выделяют зоны распространения проводящих объектов (рис. 79). Они отмечаются максимумами амплитудного A_0 и фазового $\Delta\varphi$ параметров. Ориентировочная глубина залегания (от линии полета измерительной gondoly) проводящих объектов изометричных размеров составляет $(0,3 \div 0,5) L$, а глубина до верхней кромки пластообразных тел

приблизительно равна $(0,2 \div 0,6) L$, где L — расстояние между центрами генераторных и приемных рамок.

Глубинность воздушных индуктивных методов не превышает 100—200 м.

§ 49. РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ

Радиоволновые методы основаны на изучении особенностей распространения электромагнитных полей, частоты которых изменяются в диапазоне 10^5 — 10^7 Гц, что отвечает длинам волн в воздухе от 3000 до 30 м. Распространение электромагнитной энергии в породах сопровождается явлениями поглощения и индукции, интенсивность которых возрастает как с увеличением частоты, так и с ростом проводимости среды. Это обстоятельство и определяет возможности использования радиоволн для геологического картирования и поисков. К радиоволновым методам относятся методы радиокип (радиокомпарации и пеленгации) радиоволнового просвечивания. При методе радиокип наблюдения ведут на расстояниях, значительно превышающих длину волны, а при методе радиоволнового просвечивания — на расстояниях r , соизмеримых с длиной волны (в породе), в так называемой промежуточной зоне.

1. Метод радиокип

Методом радиокип изучают особенности распространения электромагнитных полей широкоэмиттерных радиостанций, имеющих частоту от 10 до 30 кГц. Эти волны, огибая земную поверхность, проникают на некоторую глубину и в проводящих объектах индуцируют вторичное электромагнитное поле. Последнее, складываясь с первичным полем, в суммарном виде поступает в приемную антенну измерительного прибора. Поскольку наблюдения проводятся в дальней зоне (в 10—100 раз превышающей длину волны λ), то изменение первичного поля на участке съемки незначительны, поэтому изменение измеряемого суммарного поля практически полностью создается неоднородностями в верхних слоях земной коры. Наиболее заметные аномалии наблюдаются над хорошо проводящими вытянутыми объектами, а также над контактами сред с различными электромагнитными свойствами. Наилучшие результаты метод радиокип дает при изучении крутопадающих объектов, залегающих под небольшой мощностью (до 20—30 м) наносов в условиях слабопересеченного рельефа и на большом удалении (несколько километров) от промышленных предприятий, электрических линий и другого рода помех. Работа малоэффективна при магнитных бурях, резкой смене погоды, грозе, на восходе и заходе солнца, когда в атмосфере создаются помехи.

Съемку выполняют по отдельным маршрутам или по системе профилей. Для работы выбирают наиболее интенсивные радиостанции

с наибольшей длиной волны. Поскольку вектор магнитной напряженности первичного поля горизонтален и перпендикулярен к направлению радиостанции, то необходимо выбирать это направление близким к простиранию пород и рудных объектов. В этом случае первичное поле перпендикулярно к простиранию пород и в исследуемых объектах индуцирует максимальное вторичное поле. Иногда с этой целью применяют специальные передатчики.

Для измерения магнитной и электрической составляющих компонент радиоволнового поля применяется СДВР-3 (сверхдлинноволновой радиоприемник), который состоит из магнитной рамочной антенны, горизонтального электрического диполя, выносного лампового усилителя и микровольтметра на транзисторах.

Для измерения напряженности магнитного поля служит магнитная рамочная антенна, жестко скрепленная с корпусом антенного усилителя, который может вращаться на столике треноги вокруг горизонтальной оси. Столик может вращаться вокруг вертикальной оси. В горизонтальное положение он устанавливается по уровню шаровым шарниром. На корпусе усилителя имеется вертикальный лимб для отсчета углов наклона плоскости рамки антенны к горизонту и азимуту.

Для измерения электрической составляющей поля к усилителю подключается отрезок провода длиной 10—20 м, который заземляется на концах электродами. Сигналы, возникающие в магнитной антенне или электрическом диполе, усиливаются и измеряются транзисторным микровольтметром. На выходе микровольтметра имеются телефон и накопительная ячейка с измерительным прибором. Телефон позволяет осуществлять звуковой контроль за изменением интенсивности напряженности поля. Измерительный прибор применяется для отсчета напряженности в микровольтах. Накопительная ячейка служит для накопления слабых радиотелеграфных сигналов, измерения их среднего уровня и сглаживания импульсных помех. Постоянная времени накопительной ячейки изменяется от 0,1 до 9 с, что определяется уровнем помех. При низком уровне помех выбирают небольшую постоянную времени, что сокращает время отсчета по измерительному прибору.

В приборе имеется шкала настройки на необходимую радиостанцию. Для измерения вертикальной составляющей плоскости рамки антенны устанавливают горизонтально, а для горизонтальной составляющей — в вертикальное положение, вращая ее вокруг вертикальной оси до максимального отсчета. Для определения угла наклона магнитного вектора β к горизонту антенну из предыдущего положения поворачивают вокруг горизонтальной оси до максимального отсчета по стрелочному индикатору.

Измерение магнитных компонент и угла β выполняют при поисках высокопроводящих рудных тел, зон тектонического нарушения, контактов пород различного сопротивления.

При поисках и картировании непроводящих объектов (кварцевых жил, даек) измеряют электрические составляющие поля E_x при установке электрического диполя вдоль профиля и E_y при установке диполя перпендикулярно к профилю.

Измеряя поочередно на точке магнитную H_z и электрические E_x и E_y составляющие, можно, как в магнитотеллурических методах, определить импеданс

$$Z = \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}}{H_z}$$

Результаты измерений изображают в виде графиков и карт графиков измеряемых величин и выполняют в основном качественную интерпретацию. Максимумы H_z соответствуют породам повышенной проводимости. Максимумы E_x и E_y указывают на непроводящие участки. Проводящее крутопадающее тело выделяется максимумом H_p и минимумом H_z с двумя положительными экстремумами H_z . Контакт двух сред фиксируется максимумом H_z и средней точкой между экстремумами H_p . График изменения угла α над контактом также имеет экстремум. Среды с однородными электромагнитными свойствами выделяются практически нулевыми значениями H_z и α , постоянными значениями H_p , которые меняются лишь в пределах ± 10 —20%. Глубина залегания контакта приблизительно может быть вычислена по формуле

$$h_k = \frac{H_z \max}{H_p \max} \frac{l}{4}$$

где l — расстояние между экстремумами H_p .

Глубина до верхней кромки рудного тела равна $1/2$ ширины аномалии H_p на половине максимальной интенсивности или $1/2$ расстояния между максимумами H_z . По величине импеданса оценивают эффективное сопротивление среды.

2. Метод радиоволнового просвечивания

Радиоволновое просвечивание основано на изучении поглощения электромагнитных волн и связанного с ним ослабления электромагнитного поля. Метод позволяет определять наличие и контуры рудных объектов высокой проводимости, расположенных в междускважинном пространстве, а также между подземными горными выработками. Если в скв. A и B источник I электромагнитных волн (передатчик) и их приемник II поместить сначала в точки 1 , а потом в точки 2 , то во втором случае сигнал, измеренный приемником II , будет значительно слабее, ибо на пути к приемнику большая часть энергии электромагнитного излучения поглощается в рудном теле, имеющем высокую проводимость (рис. 80).

Радиоволновое просвечивание проводится с помощью специальной аппаратуры СРП (СРП-6, СРП-7 и др.). Аппаратура состоит из передатчика, приемника с самописцем и градуировочного устройства. Передатчик и приемник содержат пульта наземного управления и соответственно передающие и приемные антенны. Передатчик и приемник могут работать на нескольких частотах, в частности, для аппаратуры СРП-6 характерны фиксированные частоты 0,5; 1; 2,5; 5; 10 МГц. В аппаратуре СРП-7 можно дополнительно установить частоты 0,15; 0,3; 30 и 40 МГц.

Аппаратура СРП-6 применяется в скважинах глубиной до 1 км, а СРП-7 обладает повышенной теплостойкостью, что позволяет

ее применять в скважинах глубиной до 2 км. Она используется как в переносном варианте с ручными лебедками, так может быть вмонтирована в комплект типовых каротажных станций.

Перед началом работы аппаратуру градуируют. С этой целью к приемнику подключают генератор стандартных сигналов и на каждом диапазоне измерений задают по три-четыре сигнала нарастающей амплитуды. Вместо приемной антенны подключают ее эквивалент. По результатам градуировки

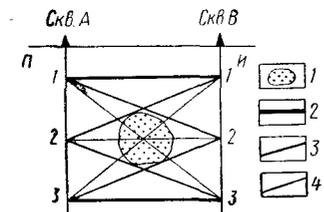


Рис. 80. Схема поглощения радиоволн при методе РВП. 1 — рудная залежь; сигналы в приемнике: 2 — интенсивные, 3 — средние, 4 — слабые

строят градуировочные графики, с помощью которых запись скважинных измерений переводят в микровольты.

Скважинные наблюдения выполняются в нескольких модификациях. Одна из них заключается в синхронном погружении передающей и приемной антенн в две скважины и записи сигналов приемника. Другая заключается в том, что приемник остается на заданной глубине в одной из скважин, а по другой передвигается передатчик. Возможен и обратный вариант, когда передатчик устанавливается неподвижно, а приемник перемещается по скважине. Масштаб записи выбирают обычно на основании предыдущих исследований и опытных работ. Расстояние между скважинами зависит от проводимости среды и мощности передатчика. Для аппаратуры СРП-6 при мощности передатчика 20 Вт оптимальное расстояние равно 200—300 м.

По результатам наблюдений строят графики изменения показаний передатчика по скважинам. Ориентировочные контуры в межскважинном пространстве залежей высокой проводимости можно оценить качественно. Предположим, что приемник *П* был установлен в точках 1, 2 и 3 скв. А, и при каждой точке стояния передатчик *И* перемещался по точкам 1, 2 и 3 скв. В (рис. 80). Соединим точки 1, 2 и 3 приемника *П* с точками 1, 2 и 3 расположения передатчика *И* прямыми линиями, толщина которых зависит от интенсивности сигналов, принятых приемником. Тогда

будет видно, что контуром поглощения волн выделяется объект высокой проводимости.

Метод радиоволнового просвечивания нашел широкое применение при поисках и разведке медноколчеданных месторождений. Необходимо указать, что для эффективного применения метода требуются определенные условия залегания рудных тел — наличие резкого контраста в проводимости рудных тел и окружающей среды. Однако довольно часто рудные тела залегают в сильно раздробленных нарушенных высокопористых зонах с повышенной рудной минерализацией, где контраст отсутствует. В таких условиях метод дает меньшую эффективность, и ослаблением радиоволн могут выделиться не только рудные залежи, но и проводящие нарушенные зоны. Отсюда вытекает принципиальная возможность применения метода для прослеживания зон тектонических нарушений.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗВЕДКИ

§ 50. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

1. Строение ядер атомов и типы радиоактивного распада

Атомы химических элементов состоят из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов оболочки; ядро — из частиц, называемых нуклонами N . К нуклонам относятся протоны p и нейтроны n . Заряд протона $+1$, масса — приблизительно 1,00758 к. е. (кислородных единиц). Нейтроны имеют массу 1,00895 к. е. и не имеют заряда. Нуклон с массой k и зарядом m записывается в виде $\frac{k}{m}N$. Число протонов в ядре атома обозначается буквой Z , отвечает порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, число нейтронов — $A-Z$, где A — массовое число ядра, равное числу нуклонов, т. е. сумме нейтронов и протонов.

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре атома ядерными силами, которые действуют лишь на весьма близком расстоянии порядка 10^{-13} см. Ядерные силы данного нуклона действуют только на соседние нуклоны. Между протонами, согласно закону Кулона, существуют силы отталкивания. Чтобы расщепить ядро атома на отдельные нуклоны, или на ядра с меньшим числом нуклонов, необходимо преодолеть ядерные силы, т. е. затратить энергию E_c , равную энергии связи нуклонов ядра:

$$E_c = -aA + bZ^2, \quad (25)$$

где a и b — некоторые коэффициенты.

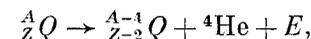
В указанной формуле величина aA определяет энергию связи, образующуюся за счет действия ядерных сил. Эта энергия отрицательна, так как при образовании ядра из нуклонов она теряется. Составляющая bZ^2 определяет энергию отталкивания. Она положительна, потому что приобретает в процессе образования ядра.

Формула (25) показывает, что при увеличении Z ядро получает все больший запас энергии, ведущей к отталкиванию нуклонов, т. е. к делению ядра. Поэтому элементы с большим количеством протонов (ядра тяжелых атомов) становятся неустойчивыми. При некоторой затрате внешней энергии или самопроизвольно они распадаются и выделяют энергию bZ^2 . Реакция распада может быть управляема человеком, а энергия ядерного распада

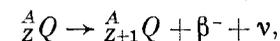
используется в мирных целях. Элементы с малым числом протонов обладают большой отрицательной энергией, поэтому ядра их имеют тенденцию к объединению — синтезу. Для получения ядерной энергии синтеза необходимо затратить дополнительную энергию на сближение нуклонов ядер, после чего начнется их самопроизвольное слияние с выделением огромного количества ядерной энергии. Для протекания реакции синтеза ядер нужна очень высокая температура, поэтому реакция называется термоядерной. Управляемая термоядерная реакция до сих пор не получена. Реакция синтеза осуществима пока лишь в ядерных бомбах. Она протекает на Солнце и звездах. Выделяющаяся при этом солнечная энергия создает благоприятные условия для существования на Земле человека, окружающего его животного и растительного мира.

Таким образом, в естественных земных условиях ядра тяжелых элементов претерпевают радиоактивный распад. В результате распада происходит излучение элементарных частиц и меняется заряд ядра. Основными типами распада являются альфа-распад, бета-распад и позитронный распад, k -захват и самопроизвольное (спонтанное) деление ядер.

В результате альфа-распада ядро теряет α -частицу (ядро гелия ${}^4_2\text{He}$), поэтому возникает новый элемент, заряд которого уменьшается на 2. Новый элемент расположен в таблице Менделеева на две клетки влево по отношению к первичному элементу. Формула альфа-распада элемента Q выглядит следующим образом:

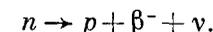


где E — энергия, вынесенная α -частицей. Бета-распад заключается в излучении отрицательно заряженной β^- -частицы, в результате чего заряд ядра увеличивается на единицу. Возникает новый химический элемент, смещенный в таблице Менделеева по отношению к исходному на одну клетку вправо. Процесс бета-распада можно выразить реакцией

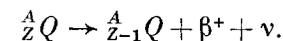


где ν — нейтрино, возникновение которого объясняется законом сохранения механического момента вращения ядра атома.

По этому закону происходит превращение нейтрона в протон:

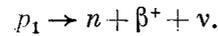


Позитронный распад наблюдается лишь у искусственно радиоактивных изотопов¹. Формула распада

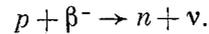


¹ Изотопами называют ядра с одинаковыми зарядами Z , но с различными массовыми числами A .

Позитрон (частица с массой, равной массе электрона, но противоположно заряженная) образуется в процессе превращения протона в нейтрон:



K-захват заключается в том, что ядро может захватывать электрон собственного атома, расположенный на K-оболочке — ближайшей к ядру электронной оболочке. В результате K-захвата протон ядра превращается в нейтрон:



Возникает новый элемент, смещенный в таблице Менделеева относительно исходного элемента на одну клетку влево. Из естественно радиоактивных элементов K-захват наблюдается у изотопа $^{40}_{19}\text{K}$.

Самопроизвольное деление элемента происходит под действием сил отталкивания протонов ядра, возникающих в соответствии с законом Кулона. Например, в природе ядро $^{238}_{92}\text{U}$ делится на две части, чаще не одинаковые, но близкие по массе, и возникают два новых элемента.

Перечисленные типы распадов могут сопровождаться излучением квантов энергии — γ -излучением. Это происходит в том случае, когда образующийся новый элемент находится в возбужденном энергетическом состоянии, т. е. обладает избытком энергии, излучающейся в виде гамма-кванта. Излучаемые при радиоактивном распаде элементарные частицы обладают энергией, измеряемой в электрон-вольтах (эВ), килоэлектрон-вольтах (кэВ) и мегаэлектрон-вольтах (МэВ). Электрон-вольт — это такая энергия, которую приобретает электрон в поле ускоряющей разности потенциалов в 1 В.

Радиоактивный распад ядер атомов происходит по экспоненциальному закону:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (26)$$

где N_0 — число атомов распадающегося вещества в начальный момент времени $t = 0$; N_t — число атомов, оставшихся в наличии к моменту времени t ; λ — скорость или постоянная распада; e — основание натурального логарифма.

Закон распада ядер атомов статистический, т. е. справедлив лишь для большого числа атомов.

Так как время полного распада (продолжительность жизни) для всех атомов теоретически бесконечно, для относительного сравнения распадов по продолжительности используют понятие периода полураспада T — времени t , за которое распадается

половина первоначального числа N_0 атомов. Подставляя в формулу (26) вместо N_t величину $N_0/2$ и вместо t период T , получим

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \approx 0,693\tau, \\ \tau = 1,44T,$$

где τ — величина, обратная постоянной распада, которая рассматривается как среднее время жизни ядра атома данного вещества.

2. Естественные радиоактивные элементы и их превращения

Естественные радиоактивные элементы — это такие элементы, которые находятся в земной коре и обладают способностью к самопроизвольному распаду. К ним относятся изотопы калия, рубидия, тория, урана, радия, радона, полония. Наиболее важное значение для радиометрической разведки имеют изотопы калия, тория и урана. Концентрации рубидия, самария и лютеция настолько малы в земной коре, что вызываемая ими радиоактивность не имеет практического значения.

В результате радиоактивного распада изотопов калия образуются стабильные элементы: аргон и кальций. Изотопы урана и тория при распаде в стабильный изотоп свинца претерпевают многочисленные превращения, в результате которых образуются ряды элементов (или семейства). В процессе превращения ^{238}U (рис. 81) в стабильный свинец образуется 14 промежуточных элементов. Восемь из них, в том числе и ^{238}U , являются α -излучателями, шесть элементов — β -излучатели. Элемент RaC является одновременно α - и β -излучателем.

У α -излучателей от ^{238}U до RaB наблюдается тенденция уменьшения периода полураспада по мере уменьшения заряда или увеличения номера радиоактивного элемента. Энергия возникающего при этом α -излучения колеблется от 4,19 МэВ ($^{238}_{92}\text{U}$) до 7,68 МэВ (RaC'). Она максимальна у элементов, имеющих очень малый период полураспада. Энергия β -излучения также увеличивается по мере уменьшения периода полураспада от 0,025 МэВ (RaD) до 3,26 МэВ (RaC). В ряду урана имеется газобразный элемент радон, который называется э м а н а ц и е й р а д и я.

Гамма-излучение в семействе урана возникает в основном в процессе следующих превращений: $\text{Ra} \rightarrow \text{Pn}$, $\text{RaB} \rightarrow \text{RaC}'$ и $\text{RaC} \rightarrow \text{RaC}'$. Энергия γ -квантов наиболее интенсивного излучения (17—66 квантов на 100 расп.) колеблется от 0,24 до 1,76 МэВ. Максимальная величина энергии γ -квантов 2,43 МэВ. В ряду распада тория ($^{232}_{90}\text{Th}$) происходит 7 α -распадов и 5 β -распадов. Наблюдается тенденция уменьшения величины T по мере уменьшения заряда ядра элемента. Альфа-частицы имеют энергию

от 4,2 до 7,79 МэВ, причем максимальные энергии приходится на распады с малой величиной T . Энергия β -излучения колеблется от 0,053 МэВ (M_sTh_1) до 2,2 МэВ (ThC). В семействе тория имеется газообразный элемент — торон, называемый эманацией тория. Гамма-излучение сопровождается следующие превращения: $M_sTh_2 \rightarrow R_dTh$, $R_dTh \rightarrow ThX$, $ThV \rightarrow ThC$, $ThC' \rightarrow Pb$ и $ThC'' \rightarrow Pb$. Энергия γ -излучения колеблется от 0,09 до 2,62 МэВ, а наиболее интенсивная часть его (от 12 до 35 квантов на 100 расп.)

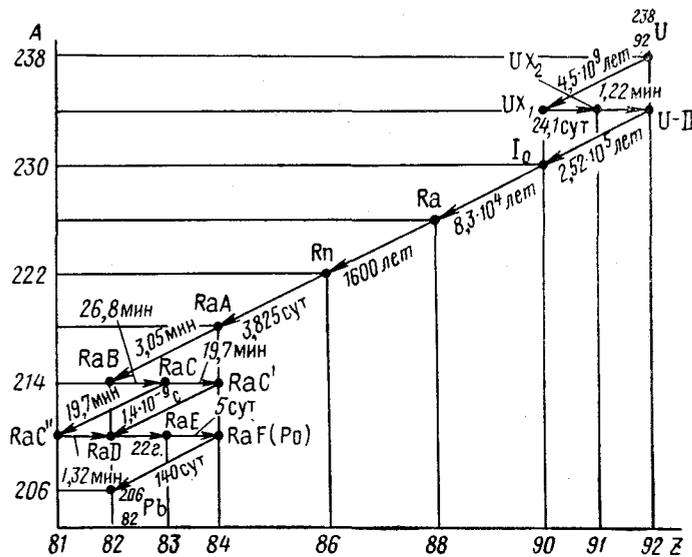


Рис. 81. Радиоактивный ряд урана-238

расположена в интервале от 0,336 до 2,62 МэВ. Необходимо отметить высокую интенсивность γ -излучения (35 квантов на 100 расп.) с энергией 2,62 МэВ.

Таким образом, спектр γ -излучения тория содержит γ -кванты более высоких энергий (2,62 МэВ) по сравнению со спектром ряда урана (1,76—2,43 МэВ). Принято говорить, что γ -излучение тория более жесткое по сравнению с γ -излучением урана. Эта разница является принципиальной основой для распознавания природы γ -излучения и разделения аномалий на урановые и ториевые. Суммарное количество γ -квантов на 100 расп. в семействе тория составляет около 30% этой величины в семействе урана. Следовательно, одинаковые концентрации радиоактивных изотопов урана и тория будут создавать разные интенсивности γ -излучения. Энергия β -лучей ряда тория также несколько выше, чем в семействе урана. Энергия α -лучей приблизительно одинакова в обоих рядах.

Распад радиоактивного изотопа ^{40}K сопровождается γ -излучением с энергиями 1,55 и 1,46 МэВ, т. е. меньшими, чем энергия γ -излучения ряда урана.

Радиоактивные элементы, образующиеся в результате превращения $^{235}_{92}U$, составляют ряд актиноурана, в котором газообразным является эманация актиния — актинон.

3. Законы распада радиоактивных элементов

Формула (26) справедлива в том случае, если образующийся при распаде элемент является стабильным. Закон распада выглядит сложнее, если новый элемент также радиоактивный. Рассмотрим элементы 1 и 2 с постоянными распада λ_1 и λ_2 и определим, каким образом меняется число атомов N_2 второго вещества со временем t , если N_1 — число атомов первого вещества. В соответствии с формулой (26), можно записать

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t}; \quad dN_2 = \lambda_1 N_1 dt.$$

Так как элемент 2 тоже распадается, то

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt,$$

или

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2;$$

$$dN_2/dt = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2.$$

Решение дифференциального уравнения приводит к формуле:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (27)$$

Формальное исследование формулы (27) показывает, что N_2 не может быть отрицательной величиной. Кроме того, при $t = 0$ и $t = \infty$ величина $N_2 = 0$. Следовательно, функция $N_2 = f(t)$ имеет положительный экстремум. Это означает, что в начальный период времени число атомов N_2 возрастает (рис. 82), затем наступает момент, когда число образующихся и распадающихся атомов N_2 становится равным. Когда вещество 1 полностью распалось, N_2 начинает уменьшаться. Момент, когда число образующихся атомов элемента 2 близко к максимуму, а число распадающихся атомов — к минимуму, т. е. когда общее число N_2 не изменяется, можно выразить условием $dN_2/dt = 0$. Это означает, что $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$, или $\lambda_1/\lambda_2 = N_2/N_1$. Такое состояние называется радиоактивным равновесием. Так как $\lambda = \ln 2/T$, то

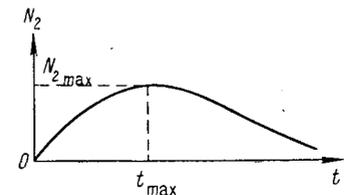


Рис. 82. График накопления радиоактивного элемента 2 при распаде элемента 1

$N_2/N_1 = T_2/T_1$, т. е. отношение периодов полураспада двух веществ равно отношению числа их атомов, находящихся в состоянии равновесия.

Из формулы (27) можно найти, что время достижения равновесия (максимума N_2)

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{\ln 2} T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Если, например, происходит образование радона из радия, то в состоянии радиоактивного равновесия число атомов радона максимально, а момент равновесия наступает при $t_{\max} = (1/\ln 2) \times \times 3,825 \text{ сут} \cdot \ln (1590 \text{ лет}/3,825 \text{ сут}) \approx 65 \text{ сут}$. Так как в формуле (27) $\lambda_1 \ll \lambda_2$ и $\lambda_1 t \ll 1$, то $e^{-\lambda_1 t} \approx 0$ и

$$N_2 = - \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t}.$$

В момент радиоактивного равновесия трех и более распадающихся веществ выполняется условие

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n.$$

В природе устанавливается равновесие между ураном и радием, при котором $N_{\text{Ra}}/N_{\text{U}} = 3,4 \cdot 10^{-7}$. Практически на 3,4 г урана в месторождениях приходится 1 г радия при условии их равновесия.

Состояние радиоактивного равновесия между ураном и радием характеризуется коэффициентом радиоактивного равновесия

$$K_{\text{pp}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{C_{\text{U}} \cdot 3,4 \cdot 10^{-7}},$$

где C_{U} и C_{Ra} — соответственно содержание урана и радия в руде, г или %.

При избытке радия ($K_{\text{pp}} > 1$) говорят, что равновесие сдвинуто в сторону радия. При избытке урана ($K_{\text{pp}} < 1$) говорят, что равновесие сдвинуто в сторону урана.

4. Свойства радиоактивных излучений

Способностью к α -излучению обладают многие элементы рядов урана, тория, актиноурана. Альфа-частицы, попадая в среду, окружающую радиоактивный элемент, вызывают ионизацию молекул газа. Это объясняется тем, что между положительно заряженными α -частицами и электронами атомов возникают взаимодействия, связанные с законом Кулона. Альфа-частица вырывает из оболочки атома электрон, вследствие чего возникают пары ионов: положительно заряженный атом и отрицательно

заряженный электрон. Количество образующихся пар ионов от действия одной α -частицы при нормальном давлении и 0°C составляет от 1 до $2,5 \cdot 10^5$. В ряду урана наиболее сильную ионизацию создают α -частицы распадающихся элементов RaC', Rn и Po, в ряду тория — α -частицы элементов ThA, Th и ThC'. В среднем ионизация α -частицами элементов ряда урана в 3,5—4 раза выше ионизации частицами ряда тория. Способность α -частиц ионизировать газы позволяет определять количество радиоактивных элементов по интенсивности α -излучения. α -частицы имеют ничтожную проникающую способность. Их свободная длина пробега в воздухе при 0°C и нормальном давлении — от 2,53 до 6,6 см. Тонкие пластинки из алюминия (0,04 мм), железа, меди и свинца (0,02 мм) или слой воды 0,06 мм полностью поглощают α -излучение. Это означает, что для определения радиоактивности по α -излучению требуется непосредственный контакт излучаемого вещества с датчиком измерительного прибора.

Проникающая способность β -излучения несколько больше, чем α -излучения, однако она также невелика. Пластика алюминия толщиной 8 мм или свинца 0,5 мм практически полностью поглощает β -излучение. Ионизирующая способность β -лучей значительно (в сотни раз) ниже по сравнению с α -излучением. Проникающая способность γ -излучения значительно выше β - и α -излучения, однако для естественно радиоактивных элементов она тоже незначительна. Слой любой горной породы толщиной около 1 м или слой воды в несколько метров практически полностью поглощают γ -излучение. Лишь космическое γ -излучение больших энергий (миллиарды электрон-вольт) проникает в горные породы на глубину нескольких десятков метров.

При прохождении γ -излучения через вещество и в процессе его поглощения происходят взаимодействия трех видов: фотоэлектрическое поглощение, поглощение и рассеяние по эффекту Комптона и рождение электронно-позитронных пар. Фотоэлектрическое поглощение характерно в основном для γ -квантов слабых энергий (до 0,4—0,5 МэВ). При нем γ -квант поглощается одним из электронов, находящимся на внутренней оболочке атома. Наибольшее поглощение наблюдается на К-оболочке. Интенсивность фотопоглощения γ -квантов пропорциональна Z^5 и обратно пропорциональна $E^{3,5}$ (E — энергия γ -кванта). Таким образом, фотоэлектрическое поглощение γ -квантов наиболее интенсивно (эффективно) происходит в веществах с большим порядковым номером и для γ -лучей небольших энергий (для мягкого γ -излучения).

Для γ -излучения энергий 0,5—1 МэВ наиболее характерны поглощение и рассеяние по эффекту Комптона (рис. 83). Они

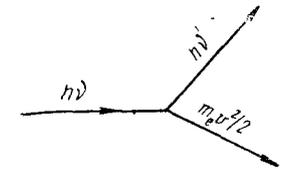


Рис. 83. Схема эффекта Комптона

заканчиваются в том, что γ -квант лишь частично поглощается электроном по формуле

$$h\nu = h\nu' + \frac{m_e v^2}{2} + E_n,$$

$h\nu$ — энергия падающего фотона; $h\nu'$ — электромагнитное излучение рассеянного фотона; $m_e v$ — кинетическая энергия движения электрона; v — скорость движения электрона; m_e — масса электронов; E_n — энергия ионизации атома.

В результате этого явления уменьшается энергия первичного γ -кванта и меняется направление его движения. Интенсивность Комpton-эффекта определяется в основном плотностью поглощающей породы и мало зависит от порядкового номера элементов.

При взаимодействии с веществом γ -квантов больших энергий (более 1 МэВ) наиболее характерным является эффект рождения электронно-позитронных пар. Он заключается в том, что вблизи ядра γ -квант большой энергии превращается в электрон и позитрон в соответствии с формулой Эйнштейна $E = mc^2$, где c — скорость света.

Ионизация молекул газа γ -лучами по сравнению с ионизацией β - и α -лучами намного меньше.

5. Единицы измерения естественной радиоактивности

Радиоактивность измеряется в единицах количества, концентрации и излучения радиоактивных веществ. Количество радия измеряется в граммах или миллиграммах, а количество продуктов его распада — в единицах кюри (Ки). Кюри — количество продукта распада радия, которое соответствует его равновесному с радием состоянию. После открытия искусственно радиоактивных элементов единица кюри стала означать количество изотопов, которому соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ распадающихся в 1 с атомов. Это связано с тем, что 1 г Ra или 1 Ки равновесных ему веществ испускает в 1 с примерно $3,7 \cdot 10^{10}$ α -частиц. Более мелкие единицы, производные от кюри, следующие: милли-, микрокюри (мКи, мкКи) и т. д. Часто применяют единицу грамм-эквивалент радия. Это такое количество вещества, которое на определенном расстоянии от датчика измерительного прибора создает такую же интенсивность γ -излучения, что и 1 г Ra на этом же расстоянии.

Для измерения концентрации урана, радия и тория в твердом веществе применяют единицы 1 г/г или 1 г/см³, а для искусственно радиоактивных изотопов — 1 Ки/г или 1 Ки/см³. Концентрация жидких радиоактивных веществ измеряется в граммах на кубический сантиметр и граммах на литр (г/л), а концентрация газообразных веществ в кюри на кубический сантиметр (Ки/см³), в кюри на литр (Ки/л) или в эманах (1 эман = 10^{-10} Ки/л).

Количество или доза γ -излучения измеряется в рентгенах (Р), милли- и микрокюри (мР и мкР). 1 Р — это такое количество

поглощенного излучения, при котором в 1 см³ воздуха при 0° С и 760 мм рт. ст. образуются ионы, несущие 1 эл.-ст. ед. электричества каждого знака. Мощность дозы (или интенсивность γ -излучения) измеряют соответственно в Р/ч, мР/ч, мкР/ч.

Доза α -, β -лучей и протонов измеряется в физическом эквиваленте рентгена (ФЭР или РЭФ) или в радах (1 рад — доза излучения, при которой в 1 г облучаемого вещества поглощается энергия 100 эрг). Мощность дозы в этом случае измеряется в рад/г.

6. Эталоны радиоактивности

Эталоны радиоактивности применяются для градуирования аппаратуры в стандартных единицах радиоактивности. Они могут быть твердыми и жидкими. Твердые эталоны необходимы для градуировки приборов, измеряющих γ - и β -излучения. Они состоят из цилиндрических латунных патронов диаметром около 1 см и длиной 6—8 см, в нижней части их в платиновой ампуле помещается некоторое количество (обычно доли миллиграмма) радия. На расстоянии 1 м оно создает определенную интенсивность J_0 гамма-излучения, которая указана в паспорте эталона. Интенсивность J на расстоянии R (в м) от эталона определяется по формуле:

$$J = J_0/R^2. \quad (28)$$

Для эталонирования аппаратуры, предназначенной для измерения концентрации радиоактивных элементов, применяют жидкие эталоны — растворы солей радия в воде. Они выпускаются в стеклянных ампулах и хранятся в запаянных стеклянных сосудах — барботерах. К эталонам прилагается паспорт, где указаны объемы барботера и раствора, количество растворенного радия, дата и время (часы и минуты), когда барботер был запаян. Зная время закрытия барботера, можно в любой момент вычислить концентрацию накопившегося в эталоне радона.

Для радиометрического анализа порошковых проб по α -, β - или γ -излучению применяются порошковые эталоны, состоящие из равновесной радиоактивной руды (урана, тория) или калия с известным содержанием элемента, определенным с высокой точностью.

Для повседневного контроля чувствительности радиометрической аппаратуры в комплекте с ней выпускаются рабочие эталоны. Для пешеходных радиометров они имеют форму дисков, толщиной 3—5 мм и диаметром 25—35 мм, изготовленных из алюминия. В центре диска помещается обычно радиоактивный изотоп ⁶⁰Со с периодом полураспада около 5 лет. Для контроля чувствительности самолетных и автомобильных радиометров применяют смеси порошков радиоактивной руды и нерадиоактивного материала, помещенные в коробочки прямоугольной или цилиндрической формы.

При работе с эталонами радиоактивности необходимо соблюдать осторожность, поскольку радиоактивные вещества и их излучения представляют опасность для организма человека. Эталоны радиоактивности должны храниться в свинцовых контейнерах и извлекаться из них только для проведения измерений. Сухие эталоны радия необходимо переносить во время работы с помощью шестов. Доза D , полученная человеком при работе с эталоном (в бэр $\cdot 10^{-6}$):

$$D = J_R t,$$

где J_R — интенсивность эталона (в мкР/ч) на расстоянии R (в м); t — время облучения эталоном (в ч); бэр — биологический эквивалент рентгена.

Эталон радиоактивности нужно держать на таком расстоянии R от поверхности тела человека, чтобы полученная доза облучения не превышала допустимую [6].

При работе с жидкими и порошковыми эталонами радия нужно следить, чтобы радиоактивная жидкость или порошок не попал на одежду, руки и особенно внутрь организма. Работающие с радиоактивными веществами должны носить спецодежду: халаты и шапочки, а при работе с радиоактивными растворами — пользоваться клеенчатыми или хлорвиниловыми фартуками. Вход в спецодежде в столовую и другие помещения, где не ведется работа с радиоактивными веществами, не допускается. В комнатах, где ведутся работы с радиоактивными веществами, запрещается курение, прием пищи и хранение пищевых продуктов. После прекращения работы, перед едой и курением, следует тщательно мыть руки и проверять их чистоту дозиметрами.

§ 51. ПРИБОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиоактивные излучения могут быть зарегистрированы двумя методами: ионизационным и импульсным. В ионизационном методе в качестве регистрирующих приборов применяют ионизационные камеры, а в импульсном — счетчики излучения.

С помощью ионизационных камер измеряют интенсивности α -излучения, имеющего большую ионизационную способность, реже — β -излучения. С помощью счетчиков измеряют все виды радиоактивных излучений.

1. Ионизационная камера

Ионизационная камера (рис. 84) состоит из металлического герметизированного корпуса K , внутри которого имеется электрод \mathcal{E} . К электроду и корпусу через резистор R приложена разность потенциалов ΔU порядка сотен — тысяч вольт. При отсутствии в камере радиоактивного излучения в электрической цепи тока нет. Если в камеру поместить радиоактивное вещество или

закачать радиоактивную эманацию, то воздушное пространство между электродом и корпусом становится электропроводным и через измерительный прибор $ИП$ будет идти электрический ток. Величина его пропорциональна числу образуемых в пространстве пар ионов и, следовательно, концентрации эманации или интенсивности излучения вещества B . В первых выпусках радиометрической аппаратуры ионизационные камеры были составной частью электрометров для измерения радиоактивности порошковых проб и полевых эманометров, измеряющих концентрацию радиоактивных газов в почвенном воздухе. В настоящее время ионизационные камеры в разведочной геофизике применяются очень редко.

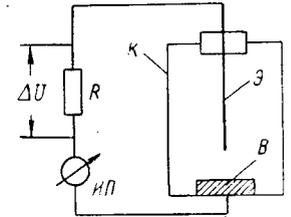


Рис. 84. Схема ионизационной камеры

2. Газоразрядные счетчики

Газоразрядный счетчик (рис. 85, а), предложенный Гейгером и Мюллером, состоит из анода (обычно вольфрамовой нити) A и катода K , изготовленного из меди, стали, вольфрама или другого металла, помещенных в стеклянный герметизированный корпус KC . Внутреннее пространство счетчика заполнено смесью инертных газов, находящихся под давлением около 100 мм рт. ст. К аноду и катоду приложено высокое напряжение ΔU порядка сотен — тысяч вольт. Когда в рабочем пространстве счетчика отсутствует радиоактивное излучение, тока в цепи измерительного устройства $ИУ$ нет. При попадании в корпус K β -частицы рабочее пространство счетчика ионизируется, вследствие чего на резисторе R создается импульс напряжения и через конденсатор C на измерительное устройство $ИУ$ поступает ток. Гамма-кванты обладают малой ионизацией, но, попадая в материал катода, выбивают из него вторичные электроны, которые ионизируют молекулы газа. Число импульсов тока, поступающих на измерительное устройство, при постоянной частоте поступления на счетчик частиц зависит от напряжения ΔU . График изменения частоты I импульсов от величины приложенного к системе анод — катод напряжения U называется рабочей характеристикой счетчика (рис. 85, б). По мере роста напряжения от нуля до некоторой величины A образовавшиеся в рабочем пространстве счетчика ионы, двигаясь к аноду, частично рекомбинируются. С увеличением напряжения скорость ионов растет, поэтому все большее число их попадает на анод, не успевая рекомбинироваться. На участке AB графика все ионы достигают анода, а рост напряжения от U_A до U_B практически не ведет к увеличению числа импульсов на выходе счетчика. Когда напряжение превышает U_B , скорость ионов возрастает настолько, что, двигаясь к аноду, они производят вторичную ионизацию молекул

газа, и в результате на участке BB возникает лавинный разряд. При напряжении, большем U_B , число импульсов не зависит от частоты поступления на счетчик радиоактивных частиц. Слабо наклонный участок AB графика, называемый «плато», является рабочим интервалом напряжения питания счетчика. В этом интервале частота следования импульсов тока на выходе счетчика пропорциональна интенсивности радиоактивного излучения. Рабочее напряжение U_{PH} выбирается в средней части PH плато (рис. 85, б).

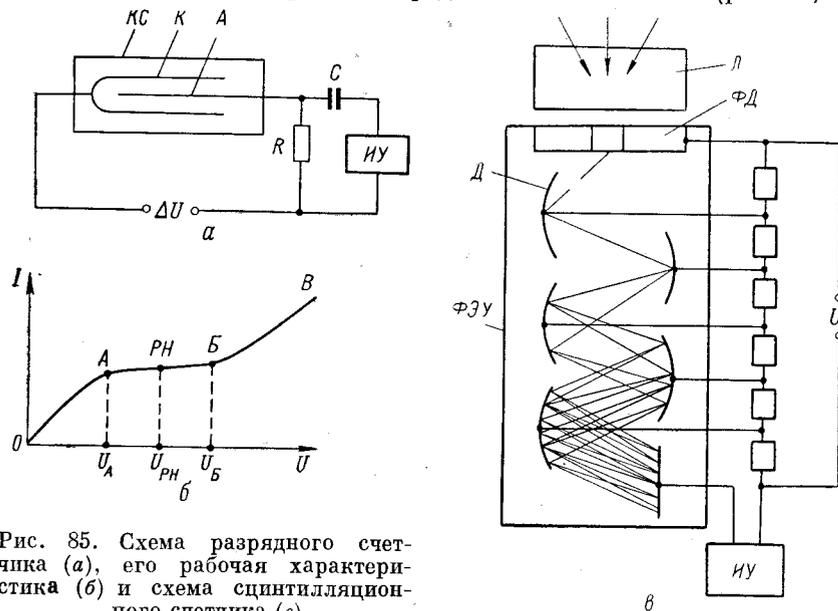


Рис. 85. Схема разрядного счетчика (а), его рабочая характеристика (б) и схема сцинтилляционного счетчика (в)

Для того чтобы счетчик мог зафиксировать очередную частицу излучения, требуется некоторое время, в течение которого прекратится разряд, вызванный предыдущей частицей.

Это время характеризует разрешающую способность счетчика, определяемую наибольшим числом частиц (квантов), которые могут быть зарегистрированы счетчиком за 1 с. Разрешающая способность газоразрядных счетчиков цилиндрического типа изменяется в пределах 500—1000 имп/с. При более высокой частоте поступления частиц (квантов) не все из них будут зарегистрированы и пропорциональность показаний измерительной схемы прибора нарушится.

Отношение числа зарегистрированных частиц (квантов) к числу частиц (квантов), падающих на детектор излучения, выраженное в процентах, называется эффективностью регистрации. Для газоразрядных счетчиков β -излучения эффективность достигает 100%, а для счетчиков γ -излучения — около 1%. В зависимости от материала катода счетчики маркируются буквами

МС (медные), ВС (вольфрамовые), АС (алюминиевые), СТС (стальные) и т. д.

Газоразрядные счетчики широко применялись в первых выпусках радиометрической аппаратуры. Сейчас они используются все реже и вытесняются сцинтилляционными счетчиками.

3. Сцинтилляционные счетчики

Газоразрядные счетчики наиболее чувствительны к γ -излучению высоких энергий (более 0,4—0,6 МэВ). Между тем, в горных породах вследствие эффектов ослабления и рассеяния преобладают γ -кванты малых энергий. Это ведет к тому, что эффективность разрядных счетчиков при измерении общей доли излучения низкая. Из общей суммы поступающих в разрядный счетчик частиц вторичные электроны выбивают из материала катода лишь несколько процентов γ -квантов, имеющих наиболее высокие энергии. Поэтому в последнее время для регистрации радиоактивного излучения большое распространение получили сцинтилляционные (люминесцентные) счетчики. Они регистрируют частицы с энергиями от нескольких десятков килоэлектронвольт и выше. Поэтому эффективность сцинтилляционных счетчиков достигает 60—70%.

Другой особенностью сцинтилляционных счетчиков является хорошо выраженная зависимость амплитуды импульсов на выходе счетчика от энергии падающего излучения. Это создает широкие возможности для их применения с целью установления природы излучающего объекта по энергии излучения.

Третьей особенностью сцинтилляционного счетчика является высокая разрешающая способность (10^7 — 10^9 имп/с), что позволяет иметь пропорциональность показаний прибора в широком диапазоне измерений интенсивности излучений.

Сцинтилляционный счетчик состоит из люминофора L (рис. 85, в) и фотоэлектронного умножителя ФЭУ. Бета-частицы, попадая в люминофор, вызывают в нем вспышки света. Гамма- и альфа-лучи, воздействуя на вещество люминофора, вызывают возникновение в нем вторичных электронов, которые также вызывают вспышки света. Свет воспринимается фотоэлектронным умножителем. Электроны, возникающие в люминофоре L , поступают сначала на фокусирующий диод $ФД$, на котором они концентрируются в виде пучка, и затем направляются на первый диод $Д$ (фотокатод). Диноды имеют положительный потенциал, который создается напряжением U . Каждый электрон выбивает с фотокатода несколько вторичных электронов. Они под воздействием электрического поля ускоряются и направляются на второй диод. На нем и последующих динодах происходят аналогичные процессы. Число динодов в фотоэлектронных умножителях 8—12 и более. В результате этого под воздействием одной частицы

излучения возникает импульс напряжения, усиленный в несколько миллионов раз. Импульсы напряжения с выхода ФЭУ поступают на измерительное устройство ИУ. Амплитуда импульсов напряжения пропорциональна энергии поступающего в люминофор излучения. Чем выше плотность вещества люминофора, тем больше величина поглощаемой им энергии и количество возникающих вторичных электронов, т. е. интенсивнее вспышка света. Чем выше прозрачность люминофора к возникающему в нем световому излучению, тем большая часть света люминесценции поступает на ФЭУ. Поэтому для изготовления люминофоров применяют вещества высокой плотности и прозрачности. В радиометрической аппаратуре нашли применение смешанные кристаллы (кристаллофоры), органические люминофоры, жидкие люминофоры, пластмассовые сцинтилляторы, а также люминофоры из стекла.

Наиболее широкое применение имеют кристаллофоры, изготовленные из галогенидов щелочных металлов, активированные солями тяжелых металлов. К ним относятся кристаллы иодистого натрия NaI(Tl), иодистого цезия CsI(Tl), активированных таллием, а также сернистого цинка ZnS(Ag). Кристаллы NaI(Tl) применяются в основном для регистрации γ -излучения больших энергий (более 0,1 МэВ) и α -частиц с энергиями 10 МэВ и более. Кристаллы CsI(Tl) применяются для регистрации α -, β - и мягкого γ -излучения. Кристаллофоры сернистого цинка применяют для регистрации α -излучения. Так как прозрачность ZnS низкая, кристаллофоры изготовляют в виде тонких слоев мелкокристаллического порошка. Смеси сернистого цинка с водородсодержащими веществами, литием или бором применяются для регистрации быстрых и медленных нейтронов. Здесь происходят реакции $^{10}_5\text{B} + n \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$ и $^6_3\text{Li} + n \rightarrow ^3_1\text{H} + ^4_2\text{He}$ с выделением α -частиц, которые вызывают в люминофоре свечение.

Органические люминофоры (монокристаллы и их жидкие или твердые растворы) имеют небольшую плотность, но высокую прозрачность. Технология их изготовления простая и позволяет получить люминофоры больших размеров. Наиболее широко применяются антрацен $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ и стильбен $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$ для регистрации β -излучения. В аппаратуре для β - и γ -измерений, требующей больших размеров датчиков, применяют жидкие растворы (в бензоле, ксилоле, толуоле и циклогексане) органических люминесцирующих тел или их твердые растворы (пластмассы) в поливинилтолуоле, полистироле и других полимерах.

В последнее время нашли применение люминофоры из стекла, активированного цезием. Стекла, активированные цезием с добавкой лития (^6Li), применяются в качестве люминофоров при регистрации медленных нейтронов.

Полевая радиометрическая аппаратура предназначена для измерения α -, β - и γ -активности горных пород в процессе пешеходной, автомобильной и воздушной съемок, для обнаружения и определения концентрации радиоактивных эманаций в почвенном воздухе, воде, горных выработках. По типу применяемых счетчиков аппаратура подразделяется на газоразрядную и сцинтилляционную.

1. Полевые переносные радиометры

Из приборов с газоразрядными счетчиками практическое значение имеют радиометры РПП-1, выполненные на полупроводниках (рис. 86).

Газоразрядные счетчики С, установленные в гильзе, регистрируют γ - или β -излучение. Питание на счетчики поступает от высоковольтного генератора ВГ.

Импульсы, возникающие на выходе счетчика, предварительно проходят через усилитель мощности УМ, что позволяет передать их по низкоомному кабелю в измерительную схему пульта управления. На выходе этой схемы импульсы имеют ничтожно малую амплитуду, и для того, чтобы их воздействие было отмечено прибором, они проходят через усилитель У, затем поступают на нормализатор Н-ждущий мультивибратор. На входе его импульсы имеют различные длительность (ширину) и амплитуду. На выходе мультивибратора под воздействием каждого импульса возникают импульсы, имеющие одинаковую длительность и амплитуду. Нормализованные импульсы заряжают конденсатор интегрирующего контура ИК до определенного напряжения. Чем больше частота поступления на нормализатора импульсов, тем выше на обкладках конденсатора напряжение и тем больший ток проходит через сопротивление, подключенное параллельно конденсатору. В цепи конденсатора последовательно с сопротивлением включается измерительный прибор ИП — микроамперметр. Величина тока, проходящего через него, пропорциональна частоте нормализованных импульсов, т. е. она пропорциональна частоте (интенсивности) поступающего на счетчик излучения. При отсутствии нормализатора такой пропорциональности не наблюдалось бы: слабые импульсы тока,

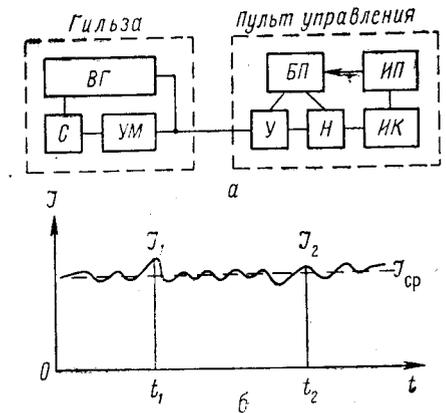


Рис. 86. Блок-схема полевого радиометра (а) и характер статистических флуктуаций (б)

поступающие с выхода счетчика, заряжали бы конденсатор до напряжения незначительной величины, а импульсы большой амплитуды — до большой величины. Следовательно, суммарный эффект от большого числа импульсов малой амплитуды и длительности был бы равен суммарному эффекту от поступления небольшого числа импульсов, имеющих значительную амплитуду и большую длительность.

Назначение интегрирующего контура поясним с помощью рис. 86, б. Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону, т. е. мгновенные значения интенсивности излучения J_1 и J_2 , измеренные в разные моменты времени, например, t_1 и t_2 , различны. Такие колебания интенсивности носят название ф л ю к т у а ц и й. В то же время колебания происходят около постоянного значения интенсивности $J_{\text{ср}}$. Она может быть получена путем осреднения показаний, полученных в течение некоторого промежутка времени. Такое осреднение выполняется в измерительной схеме прибора с помощью интегрирующего контура. Измерительный прибор, подключенный к цепи конденсатора, измеряет ток, обусловленный средним значением напряжения конденсатора. Интервал осреднения определяется постоянной времени τ интегрирующего контура. При малой постоянной времени конденсатор заряжается быстрее, промежуток осреднения небольшой, следовательно, отсчет будет менее точным; при большой постоянной времени промежутки осреднения увеличиваются и точность отсчета также повышается.

При измерении γ -излучения к гильзе прибора подключают датчик Т-образной формы, содержащий четыре счетчика СТС-8, а для измерения β -излучения — датчик Г-образной формы со счетчиком СТС-6, который экранируется кожухом и защитной оболочкой. В кожухе имеются окна, закрытые фольгой, через которые проникают β -лучи. В защитной металлической оболочке сделаны открытые окна. Оболочка может поворачиваться на кожухе, благодаря чему в рабочем положении окна в ней совмещаются с окнами кожуха. В нерабочем положении окна кожуха закрываются, предохраняя экраны из фольги от повреждения.

На пульте управления установлены выключатель блока питания ВП и переключатель диапазонов измерений интенсивности излучения, реостат установки режима питания, измерительный прибор (служащий одновременно для контроля режима питания), телефон для слуховой индикации импульсов, переключатель постоянной времени интегрирующего контура, кнопка «сброс» для закорачивания интегрирующего контура после измерения, что позволяет быстро вернуть стрелку на нулевой отсчет.

При регистрации γ -излучения имеется возможность установить пределы измерения 50, 250 и 1250 мкР/ч или в 2 раза большие. При подключении β -датчика прибор измеряет интенсивность, эквивалентную интенсивности γ -излучения. Пределы ее измерения в 5 раз больше перечисленных.

Перед измерением включают питание прибора и устанавливают необходимые режимы питания, диапазон измерения и постоянную времени. Датчик прибора прикладывают к измеряемому веществу и выжидают некоторое время (2τ — 3τ), пока стрелка прибора не будет колебаться в пределах некоторого постоянного отрезка шкалы. Далее берут отсчет, осредняя показания в этом отрезке.

Широко распространенным прибором для пешеходной радиометрической съемки является сцинтилляционный радиометр СРП-2. Электрическая схема его состоит из люминофора, фотоэлектронного умножителя, усилителя, дискриминатора, нормализатора и интегрирующего контура с индикаторным прибором. Назначение многих элементов схемы такое же, что и в радиометре РПП-1. Отличительным элементом схемы сцинтилляционного радиометра является наличие в ней дискриминатора. В полевых радиометрах установлены пороговые дискриминаторы, служащие для подавления так называемых шумовых импульсов, вызываемых особенностями ФЭУ и не связанных с внешним излучением. Они эквивалентны импульсам, которые возникают от мягкого γ -излучения с энергией 0,05—0,1 КэВ.

Пороговый дискриминатор представляет собой ждущий мультипликатор, который срабатывает при поступлении импульсов напряжения, амплитуда которых выше амплитуды шумовых импульсов.

Электрическая схема радиометра СРП-2 выполнена на полупроводниках. Датчиком γ - и β -излучения служат установленные в цилиндрической гильзе люминофор NaI(Tl) и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-25И.

В верхней части гильзы смонтирована схема питания ФЭУ и усилитель. Гильза герметизирована, благодаря чему с ее помощью можно измерить γ - и β -излучения в водоемах, погружая ее в воду на глубину 30—40 см. Посредством кабеля гильза соединяется с пультом управления. Его внешнее отличие от пульта прибора РПП-1 заключается в том, что вместо кнопки «сброс» в приборе СРП-2 установлен реостат «усиление». Он позволяет устанавливать уровень дискриминации таким образом, чтобы в схему прибора не пропускались шумовые импульсы. Термин «усиление» отражает особенность работы схемы дискриминации. Дело в том, что дискриминатор прибора СРП-2 имеет один постоянный порог, выше которого в схему прибора проходят импульсы. Но на вход дискриминатора импульсы могут подаваться с тем или иным усилением, что и обеспечивает в конечном счете необходимый порог дискриминации.

Постоянная времени прибора СРП-2 устанавливается в пределах 2 и 5 с, т. е. в 2 раза меньше, чем для прибора РПП-1. Это вызвано тем, что при одинаковой интенсивности излучения сцинтилляционный счетчик регистрирует большее количество импульсов, чем разрядный, что позволяет обеспечить точный отсчет при меньшей постоянной времени.

2. Полевые гамма-спектрометры

При поисках месторождений радиоактивных элементов и при других исследованиях часто возникает необходимость установления природы радиоактивности. Эта задача решается на основе изучения спектра γ -излучения с помощью полевых сцинтилляционных спектрометров.

Рассмотрим принцип работы спектрометров. Предположим, что в данном пункте измерения радиоактивность обусловлена породой, содержащей уран ($C_U\%$), торий ($C_{Th}\%$), калий ($C_K\%$).

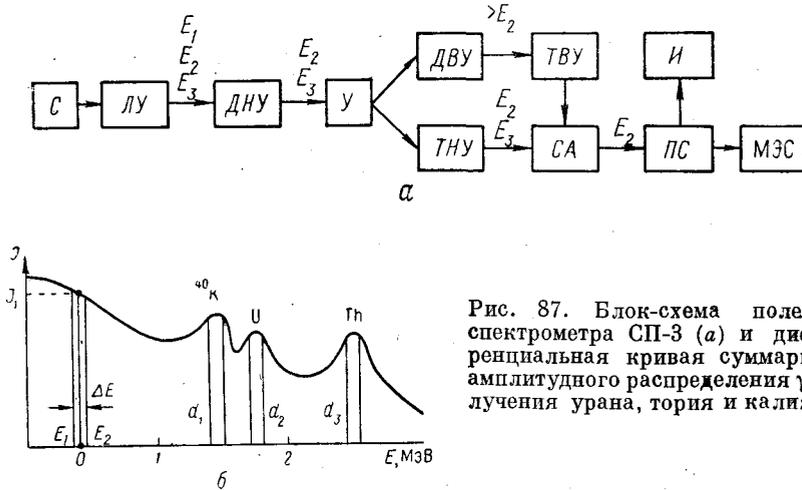


Рис. 87. Блок-схема полевого спектрометра СП-3 (а) и дифференциальная кривая суммарного амплитудного распределения γ -излучения урана, тория и калия (б)

Учитывая распределение энергий γ -квантов продуктов распада U и Th, а также наличие в породе рассеянного излучения небольших энергий, схематичное распределение интенсивностей суммарного γ -излучения в зависимости от энергий можно изобразить, как показано на рис. 87, б. Такой график называется дифференциальной кривой амплитудного распределения γ -излучения. Получить его можно путем экспериментальных измерений. С этой целью установим уровень дискриминации регистрирующего прибора $E_2 = E_1 + \Delta E$, где ΔE — ширина окна или канала дискриминации. В результате будут регистрироваться γ -кванты с энергией от E_1 до E_2 в интервале ΔE . Найдя между абсциссами E_1 и E_2 середину интервала 0, отложим от нее параллельно оси ординат величину J_1 , равную интенсивности излучения в интервале от E_1 до E_2 . Оставляя величину ΔE неизменной и задавая E_1 последовательные значения от 0,1 до 3 МэВ через выбранный интервал, получим график, изображенный на рис. 87, б. Чем меньше шаг, тем точнее будет график, чем меньше интервал ΔE , тем он больше будет дифференцирован. На графике наблюдаются три четких максимума, соот-

ветствующих характерным энергиям γ -излучения K, U и Th. Амплитуда максимумов зависит от содержания элементов в породе. Если в гамма-спектрометре установить интервал регистрации d_1 , то прибор будет регистрировать γ -излучение, во многом определяемое изотопом ^{40}K . Аналогично этому, в интервалах d_2 и d_3 существенное влияние будут иметь U и Th. Проводя соответствующую градуировку аппаратуры с помощью эталонов с известным содержанием урана, тория и калия и выполняя измерения на неизвестных объектах повышенной радиоактивности, можно определять процентное содержание каждого из указанных элементов.

В разведочной геофизике для отдельного определения содержания U, Th, K применяют полевой γ -спектрометр СП-3 (рис. 87, а). Принцип дифференциальной дискриминации прибора заключается в следующем. Пусть с выхода сцинтилляционного счетчика С в измерительное устройство поступают импульсы, соответствующие энергиям трех уровней E_1 , E_2 и E_3 ($E_1 < E_2 < E_3$). Эти импульсы линейно усиливаются усилителем ЛУ и поступают на дискриминатор нижнего уровня ДНУ. Он пропускает импульсы с амплитудами E_2 и E_3 , которые усиливаются на усилителе У и поступают одновременно на дискриминатор верхнего уровня ДВУ и триггер нижнего уровня ТНУ. Дискриминатор построен таким образом, что пропускает импульсы, амплитуда которых выше уровня E_2 . Эти импульсы (уровня E_3) поступают на триггер верхнего уровня ТВУ. Триггеры нормализуют импульсы по ширине и амплитуде. С них импульсы поступают на схему антисовпадений СА. Она не пропускает импульсы E_3 , которые пришли одновременно с обоих триггеров. Таким образом, схема антисовпадений регистрирует лишь импульсы уровня E_2 , которые поступают с дискриминатора нижнего уровня и не пропускаются дискриминатором верхнего уровня. Со схемы антисовпадений импульсы поступают на схему пересчета ПС, а с нее — на интенсивметр И и электромеханический счетчик импульсов МЭС-54.

Прибор СП-3 состоит из гильзы и пульта управления. В гильзе установлен счетчик, высоковольтный генератор для питания ФЭУ и усилитель импульсов по мощности. В пульте смонтирована измерительная схема прибора. На панели пульта установлены интенсивметр (микроамперметр) с переключателем пределов измерений, электромеханический счетчик. Интенсивметр позволяет измерять интенсивность γ -излучения в диапазонах: 250, 1000, 2500 и 10000 имп/с. На пульте управления имеются переключатели для установки уровня E_1 и ширины окна дискриминации. Уровень E_1 можно изменять от 0,15—0,3 до 3 МэВ; ширину канала ΔE — от 0,1 до 0,3—0,4 МэВ. Импульсы прослушиваются через телефон. В приборе предусмотрено осуществление пороговой дискриминации, т. е. измерение суммарной интенсивности γ -излучения, энергия которого выше определенного порога E_1 . К прибору прилагаются для настройки радиоактивный изотоп ^{65}Zn и три

рабочих эталона с урановой, ториевой и калиевой рудами. С помощью прибора СП-3 можно определять содержание урана до 0,5%, тория до 1%. Нижний порог чувствительности находится на уровне кларковых содержаний.

3. Автомобильные гамма-радиометры

Автомобильные гамма-радиометры предназначены для непрерывного измерения радиоактивности горных пород в движении. Датчиками γ -излучения в них служат газоразрядные или сцинтилляционные счетчики. Последние имеют преимущественное распространение. Схема приборов построена в основном по такому же принципу, что и схема полевых пешеходных радиометров, но содержит особенности, определяемые характером их работы. Датчики приборов находятся на некотором расстоянии от земной поверхности (0,5—1 м), где интенсивность γ -излучения ослаблена прохождением лучей в воздухе. Поэтому для уверенной регистрации радиоактивности датчики должны иметь повышенную чувствительность, что достигается за счет увеличения размеров счетчиков и люминофоров и их числа. Необходимость повышенной чувствительности диктуется также необходимостью иметь малую постоянную времени интегрирующего контура (порядка 2—3 с), ибо съемка выполняется в движении.

Импульсы, поступающие с выхода счетчика, должны быть усилены, чтобы величина тока в интегрирующем контуре могла воздействовать на электромеханическое устройство записывающего прибора.

В качестве регистрирующих приборов в автомобильных радиометрах применяют записывающие миллиамперметры, аналогичные миллиамперметру, установленному на аэромагнитометре.

Для проверки работы усилительно-регистрирующей схемы и градуировки шкалы записи в импульсах в секунду (имп/с) в автомобильных радиометрах предусмотрены ламповые генераторы периодических импульсов, форма и амплитуда которых близка к импульсам, вызванным γ -излучением. Генератор вырабатывает импульсы с частотой от 50 до нескольких сотен герц, которая может регулироваться ступенями через 50 Гц.

В аэрогамма-радиометрах имеется лентопротяжный механизм, который во время движения автомобиля протягивает бумажную ленту с регистрируемой кривой изменения радиоактивности. Лентопротяжный механизм приводится в движение через редуктор от специального электродвигателя. В схеме приборов предусмотрено устройство для отметки и печатания номеров ориентиров, с помощью которых осуществляется привязка записи к характерным ориентирам.

В связи с большими размерами и количеством счетчиков, высоким коэффициентом усиления импульсов (несколько каскадов усиления), наличием лентопротяжного механизма для питания

всех узлов прибора необходимо использовать мощный источник питания. Таким источником являются специальные преобразователи, вход которых подключается к мощным аккумуляторам автомобиля. В преобразователе постоянное напряжение 6—12 В преобразуется в переменное, усиливается и подается для питания электрических цепей прибора.

Автомобильные радиометры на сцинтилляционных счетчиках имеют дискриминаторы, позволяющие разделять радиоактивные аномалии по их природе.

Радиометры имеют массу 30—40 кг и устанавливаются обычно на автомашинах ГАЗ или УАЗ. Датчики излучения помещаются в специальном блоке в задней части кузова автомашины. Возле правого переднего сидения у ветрового стекла крепится пульт управления. Прибор обслуживают оператор и водитель автомашины.

4. Самолетные и вертолетные радиометры

Аэрогамма-съемка с вертолета или самолета ведется на высоте 20—80 м, где интенсивность γ -излучения от земной поверхности ослабляется в несколько раз, что выдвигает высокие требования для повышения чувствительности датчиков. В самолетных радиометрах первых выпусков датчики γ -излучения содержали 72 и более газоразрядных счетчиков. В настоящее время для воздушной радиометрической разведки применяется аппаратура на сцинтилляционных счетчиках. Обычно она входит в комплект аэрогеофизической станции вместе с аппаратурой для записи магнитного поля и привязки маршрутов. В станции АСГ-46 γ -излучение воспринимается тремя сцинтилляционными счетчиками, каждый из которых содержит семь кристаллов люминофоров. Чувствительность такой системы — 150—170 имп/с на 1 мкР/ч. Порог чувствительности — 0,2 мкР/ч. Сигналы от фотоумножителей предварительно усиливаются и регистрируются двумя каналами. Первый канал измеряет и записывает изменение общей γ -интенсивности по маршруту. Во втором канале установлен пороговый дискриминатор, который обеспечивает запись больших энергий (жесткую составляющую) γ -излучения, характерных для спектра излучения тория. Это позволяет по соотношению записей в двух каналах оценить природу аэрогамма-аномалий. Имеются приставки, позволяющие непосредственно регистрировать отношение общей γ -интенсивности к жесткой составляющей. По этому отношению можно судить о непрерывном изменении по маршруту соотношения между интенсивностями уранового и ториевого излучений.

Одновременно с записью радиоактивного излучения в процессе полета на ленте записывается высота полета и отмечаются ориентиры, как и при записи магнитного поля. Кассета с датчиком γ -излучения устанавливается в хвостовой части самолета.

Аналогично устроены вертолетные сцинтилляционные радиометры, предназначенные для площадных поисков радиоактивных аномалий. Радиометры, предназначенные для детализации аномалий, имеют несколько уровней дискриминации. Это позволяет судить о соотношении процентных содержаний урана, тория и калия в горных породах.

5. Настройка и эталонирование радиометров

Радиометрическую аппаратуру перед началом и периодически в процессе полевых работ (в дни профилактики) настраивают и эталонируют. Настройка заключается в проверке работоспособности и чувствительности приборов. Работоспособность проявляется в возможности аппаратуры измерять радиоактивное излучение. Она проверяется путем включения аппаратуры и проведения измерений различных интенсивностей излучения, например от эталонов. Чувствительность стрелочных индикаторов (в дел/мкР·ч⁻¹) полевых пешеходных радиометров и записывающих устройств (в имп/с на 1 см отклонения пера) настраивается в первом случае с помощью задания некоторой известной интенсивности γ -излучения, во втором — с помощью калибраторов.

При настройке чувствительности пешеходных радиометров (для данного диапазона) сначала берут отсчет n_0 без воздействия эталона, затем с помощью сухого эталона радия создают некоторую интенсивность J_3 и снова фиксируют отсчет n_3 . Величина $m = J_3(n_3 - n_0)$ покажет чувствительность стрелочного прибора (в мкР/ч на одно деление), которая должна быть примерно равна отношению J_{\max}/N , где J_{\max} — максимальная интенсивность излучения, регистрируемая в данном диапазоне; N — число делений шкалы. Если это соотношение не выполняется, то с помощью специального реостата на шасси прибора устанавливают необходимый отсчет n_3 , при котором $m \approx J_{\max}/N$.

После проверки и настройки чувствительности радиометров выполняют эталонировку, чтобы получить цену деления стрелочного индикатора или цену одного сантиметра отклонения пера в стандартных единицах радиоактивности (в мкР/ч). В приборах с автоматической регистрацией в процессе эталонирования определяется также чувствительность m_d датчика (в имп/с на 1 мкР/ч) и тем самым контролируется его исправность. Если величина m_d , полученная при эталонировке, значительно (на 10% и более) отличается от указанной в паспорте (обычно в меньшую сторону), значит датчик неисправен (трещины или помутнение кристалла, нарушение работы ФЭУ и т. д.).

Эталонирование выполняется путем задания серии интенсивностей $J_1, J_2, J_3, \dots, J_i$ с помощью обычного сухого эталона радия и измерения соответствующих им отклонений стрелки индикатора $n_1, n_2, n_3, \dots, n_i$ (в делениях шкалы) или пишущего устройства l_1, l_2, \dots, l_i (в см). Необходимую интенсивность J_i с помощью эталона радия задают путем установки его на некото-

ром расстоянии R от центра датчика, вычисляемом по формуле $R = \sqrt{J_0/J_i}$ (в м), где J_0 — интенсивность эталона по паспорту на расстоянии 1 м от датчика. Величины J_1, J_2, \dots, J_i подбирают таким образом, чтобы на каждом диапазоне получить не менее 3—4 отсчетов n_i или отклонений l_i , равномерно расположенных на шкале индикатора или на рабочей части ленты. Для эталонирования аппаратуры выбирается ровная открытая площадка, вокруг которой не должно быть предметов, являющихся источником рассеянного γ -излучения при воздействии на них эталона. Датчики приборов помещают в свинцовые цилиндры, экранируя их от рассеянного излучения от земной поверхности. Эталон при выполнении работы подвешивают на шнуре или устанавливают на шесте на высоте 2—2,5 м от земли. Так как формула для R справедлива для точечного датчика, что соблюдается, если величина R во много раз превышает размеры датчика, для эталонирования автомобильных и аэрогаммарadiометров, в которых размеры датчика велики, применяют эталоны более высокой интенсивности, устанавливая их на большом расстоянии от датчика. По результатам эталонирования для каждого диапазона строят эталонировочный график (рис. 88), по оси абсцисс откладывая интенсивности J эталона, по оси ординат — деления n шкалы индикатора или отклонения l (в см) пишущего устройства. Экстраполируя линию графика влево до пересечения с осью абсцисс, получают величину нормального фона $H\Phi$ прибора, состоящего из фона окружающих пород, космического излучения и собственного фона (загрязнения) датчика (а также автомашины, самолета, вертолета). Откладывая от точки O_1 вправо величину остаточного фона $O\Phi$ (сумму космического фона и собственного фона датчика), получают точку O_2 . От нее разбивают шкалу (см. рис. 88, деления 0, 10, 20, 30, 40), которая служит для определения γ -интенсивности пород по отсчетам n или отклонениям l пишущего устройства. Величину $O\Phi$ определяют путем измерения проэталонированным прибором гамма-излучения над поверхностью водоема глубиной 2—3 м (для полевых радиометров) или на высоте около 600 м (для аэрогаммарadiометров), где излучение земной поверхности практически не влияет, а величина космического излучения такая же, как и на поверхности Земли.

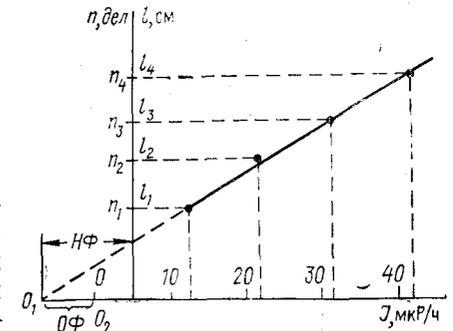


Рис. 88. График эталонирования радиометров

Основная часть градуировочных операций для сцинтилляционных спектрометров выполняется на заводе. В полевых условиях правильность показаний прибора проверяется по контрольному

источнику (в приборе СП-3 источник ^{65}Zn) и рудным эталонам урана, тория и калия. В паспорте прибора указаны эквивалентные содержания U, Th и K в рудных эталонах. Термин «эквивалентные» означает, что рудные эталоны U, Th и K дают интенсивности, которые будут получены при измерении на поверхности мощного слоя с содержаниями U, Th и K, равными эквивалентным. Таким образом, истинное содержание U, Th и K в эталонах больше эквивалентного. В паспорте указаны величины рабочих интервалов (положений переключателей дискриминаторов), в которых необходимо определять содержание того или иного элемента. В приборе СП-3 калиевый интервал (см. d_1 , рис. 87, б) регистрируется при 27—28 делениях (1,35—1,55 МэВ) дискриминаторов (суммарное показание переключателей «дискриминация»), урановый интервал (см. d_2 , рис. 87, б) — при 33—35 делениях (1,65—1,85 МэВ), ториевый интервал (см. d_3 , рис. 87, б) — при 48—54 делениях (2,5—2,7 МэВ). Это соответствие делений шкалы дискриминаторов указанным интервалам энергий будет соблюдаться в том случае, если при измерении с источником ^{65}Zn будет получено максимальное показание при 22 делениях шкалы дискриминатора. Если указанное соответствие не соблюдается, то его выполнения добиваются путем изменения усиления с помощью реостата «усиление». Эту проверку называют калибровкой прибора.

В паспорте прибора для каждого энергетического интервала для уранового эталона приведены коэффициенты

$$a_1 = \frac{I_1^U}{C_{U_1}}; \quad a_2 = \frac{I_2^U}{C_{U_2}}; \quad a_3 = \frac{I_3^U}{C_{U_3}},$$

где I_1^U, I_2^U, I_3^U — скорости счета от эталона урана соответственно на калиевом, урановом и ториевом интервалах; $C_{U_1}, C_{U_2}, C_{U_3}$ эквивалентные содержания урана на трех интервалах. Аналогичные коэффициенты приведены и для ториевого (b_1, b_2, b_3) и калиевого (c_1, c_2, c_3) эталонов. В паспорте также даны величины $C_{U_1}, C_{U_2}, C_{U_3}$ и аналогичные величины $C_{Th_1}, C_{Th_2}, C_{Th_3}$ и $C_{K_1}, C_{K_2}, C_{K_3}$ для тория и калия. Коэффициенты a_i, b_i, c_i ($i = 1, 2, 3$) служат для определения содержания радиоактивных элементов при измерениях в поле. Величина их может со временем (особенно после ремонта) меняться, поэтому в полевых условиях систематически проверяют коэффициенты с помощью эталонов U, Th и K, для которых в паспорте указаны величины $C_{U_i}, C_{Th_i}, C_{K_i}$ ($i = 1, 2, 3$). Для проверки с каждым эталоном выполняют измерения на трех энергетических интервалах и определяют коэффициенты

$$a_i = \frac{I_i^U - \Phi_i}{C_{U_i}}; \quad b_i = \frac{I_i^{Th} - \Phi_i}{C_{Th_i}}; \quad c_i = \frac{I_i^K - \Phi_i}{C_{K_i}},$$

где Φ_i — нормальный фон на интервале i .

Если между полученными и приведенными в паспорте величинами a_i, b_i, c_i расхождения не превышают 10%, пользуются паспортными величинами. В противном случае в расчетах применяют вновь полученные величины коэффициентов.

§ 53. АППАРАТУРА ДЛЯ ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Аппаратура для эманационной съемки состоит из пробоотборника, соединенного резиновым шлангом с измерительной камерой, насоса для закачки измеряемой эманации в камеру и измерительного прибора. Пробоотборник представляет собой металлический конус с отверстиями в нижней боковой части, который вставляют в шпур глубиной 0,6—1 м, пройденный в почве с помощью металлического бура. Почвенный воздух при создании в системе пробоотборника разрежения проникает через отверстия в пробоотборник и через соединительный шланг закачивается в измерительную камеру. В ней установлен фотоэлектронный умножитель, а стенки ее покрыты тонким слоем люминофора — сернистого цинка. Под действием α -излучения радиоактивной эманации на стенках камеры возникают световые вспышки, которые преобразуются фотоумножителем в электрические импульсы. В дальнейшем происходит процесс усиления, дискриминации и нормализации импульсов, как в обычном радиометре, после чего они поступают на интегрирующий контур, к которому подключен измеритель скорости счета. На этом принципе построены полевые эманометры ЭМ-6 и шахтный радиометр «Радон». Для систематического контроля чувствительности эманометров в их комплекте имеются контрольные камеры. Панели управления сцинтилляционных эманометров снабжены практически теми же элементами управления, что и радиометр СРП-2. В шахтном радиометре предусмотрена возможность непосредственного счета импульсов.

Для определения цены деления приборов в эманах их эталонируют с помощью жидких эталонов радия. С этой целью накопившийся в барботере с раствором радия радон переводят в измерительную камеру, затем клапан камеры закрывают и выдерживают систему в течение трех часов. За счет продуктов распада радона (RaA, RaC') количество α -частиц, вызывающих на стенках камеры люминесцентные вспышки, возрастает в 2,7 раза, следовательно, во столько же раз увеличатся показания прибора. Это явление повышает точность эталонирования. Количество накопившегося в барботере и переведенного в камеру эманометра радона Q_{Rn} (в Ки) определяется по формуле

$$Q_{Rn} = Q_{Ra}(1 - e^{-\lambda t}),$$

где Q_{Ra} — количество радия в жидком эталоне, г; t — время, прошедшее с момента запайки барботера и момента эталонирования, ч; λ — постоянная распада радона.

Концентрация радона C_{Rn} в камере эманометра объемом V в эманах будет:

$$C_{Rn} = \frac{Q_{Rn}}{V} \cdot 10^{10}.$$

Следовательно, цена деления k прибора в эманах определится по формуле

$$k = \frac{Q_{Rn}}{V n_0} \cdot 10^{10} = \frac{2.7 Q_{Ra} (1 - e^{-\lambda t})}{n_{3ч} V} \cdot 10^{10}, \quad (29)$$

где n_0 — мгновенный отсчет (сразу после введения радона в камеру); n_3 — отсчет после трехчасовой выдержки радона в камере.

§ 54. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРОБ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Измерение естественной радиоактивности проб горных пород в лабораторных условиях выполняется с целью определения содержания в пробе радиоактивных элементов. Для этого применяют сцинтилляционные лабораторные спектрометры, позволяющие определять содержание различных элементов на основе изучения спектрального распределения γ -, β - и α -излучения. Сцинтилляционные гамма-спектрометры подразделяются на спектрометры с пороговой и дифференциальной дискриминацией. Среди дифференциальных спектрометров имеются как одноканальные приборы, так и многоканальные (до 100 каналов). Последние позволяют одновременно измерять γ -излучение в нескольких интервалах энергетического спектра.

К лабораторным спектрометрам с пороговой дискриминацией относится полевой лабораторный радиометр РАП-1. С его помощью определяют содержание в пробах урана и тория при наличии радиоактивного равновесия между ураном и радием. Примером спектрометра с дифференциальной амплитудной дискриминацией для стационарных лабораторных условий является установка ЛАС. На ней можно выполнять измерения α -, β - и γ -излучений проб. Установка позволяет путем изучения спектра γ -излучения раздельно определять уран (равновесный) и торий в смешанных пробах с содержанием урана от 0,01% и более. Комбинированные γ - β -измерения позволяют определять малые содержания ($3 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-4}\%$) урана в неравновесных рудах. Путем измерения α -излучения имеется возможность определить активность пробы в эквивалентных единицах равновесного урана и судить о наличии в ней тория.

С помощью специального прибора для лабораторных α -измерений РАЛ-1 можно выполнять те же определения, что и с α -дат-

чиком установки ЛАС и, кроме того, определять концентрации эманаций в пробах воздуха. Датчиком для исследования порошковых проб является плоская прозрачная подложка диаметром 15 см с тонким слоем (4—8 мг/см²) цинк-сульфидного люминофора. Датчиком измерения эманаций является цилиндрическая камера, на внутреннюю поверхность которой нанесен светосостав толщиной 100 мг/см². Через прозрачную торцовую стенку камеры или с подложки сцинтилляции воспринимаются фотоумножителем.

Большие возможности для радиометрического анализа создаются с применением многоканальных спектрометров. Примером таких приборов является универсальная лабораторная установка ЛСУ-5к («Лаура») с 5-канальным дифференциальным дискриминатором. Исследуемая порошковая проба в специальном плексигласовом стакане 1 (рис. 89) помещается между датчиками γ - и β -излучений. Датчиком γ -излучения является кристалл 2 с вмонтированным в него α -реперным источником 3. Датчиком β -излучения служит порошок стиблена 4, нанесенный на плексигласовую пластинку 5 слоем 50—60 мг/см². Световые вспышки, возникающие в датчиках, воспринимаются одновременно фотоумножителями 6 и 7.

Электрические импульсы, возникающие на выходе ФЭУ, усиливаются и поступают на четыре блока дифференциальных дискриминаторов, а после них — на пересчетные устройства, которые могут уменьшать число поступающих импульсов в 2, 10 или 100 раз, и на электромеханические счетчики. Каждый дискриминатор имеет регулируемые начальный порог дискриминации E_1 (от 1 до 79 В через 1 В) и ширину окна ΔE (2, 4, 6, 8, 10 и 12 В). Гамма-излучение может быть также записано на внешний самописец. Альфа-реперный источник 3 служит для стабилизации высокого напряжения ФЭУ. Импульсы от него с выхода ФЭУ проходят через пороговый дискриминатор на интегрирующий контур. Между интегрирующим контуром и схемой питания ФЭУ существует обратная связь. Это приводит к тому, что при изменении напряжения питания ФЭУ изменится амплитуда сигнала от реперного источника и, следовательно, величина тока в интегрирующем контуре (ибо импульсы поступают в него в ненормализованном виде). Данное явление через цепь обратной связи приводит к компенсации изменения высокого напряжения на ФЭУ, т. е. к его стабилизации.

Импульсы от бета-датчика с выхода ФЭУ через пороговый дискриминатор (срезающий шумовой фон) поступают на

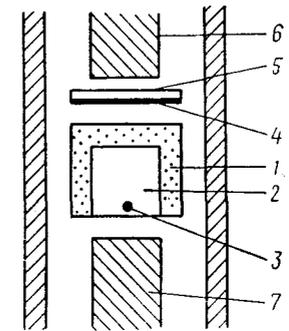


Рис. 89. Схема устройства датчика установки «Лаура»

пересчетное устройство и электромеханический счетчик пятого канала.

С помощью установки «Лаура» путем комплексного γ - β -изучения пробы имеется возможность вести раздельное определение содержания в пробе урана (от $2 \cdot 10^{-4}\%$ и выше), радия (от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-4}\%$ в эквиваленте равновесного урана), тория (от $10^{-4}\%$), калия (от 0,2—0,3%). Длительность полного анализа одной пробы массой 150—200 г — около 30 мин.

§ 55. МЕТОДИКА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ПОИСКОВ РАДИОАКТИВНЫХ РУД

Поиски радиоактивных руд ведутся как специализированными экспедициями и партиями, так и другими геологическими организациями попутно с решением различных задач.

Специализированные поиски ведутся в наиболее перспективных районах и характеризуются определенной этапностью. На первом этапе выполняются поисковые работы обычно в масштабах 1 : 25 000—1 : 50 000. В труднопроходимых районах часто применяется аэрометрическая (самолетная или вертолетная) съемка, в степных и лесостепных районах — автогамма-съемка. В процессе поисковых работ осуществляется предварительная детализация и оценка природы аномалий. При аэро- и автомобильных исследованиях выполняется наземная проверка аномалий с определением их природы гамма-спектрометрами или эманометрами. По результатам поисковых работ выбираются участки для детальных поисков. Ими могут быть как отдельные аномалии, так и группа аномалий, имеющих наибольшую интенсивность и преимущественно урановую природу. Детальные поиски ведутся в масштабах 1 : 10 000—1 : 5000 методами гамма-бета-съемок и эманационной съемки. На детализированных и вновь выявленных гамма-аномалиях выполняют детальные эманационные исследования и гамма-спектрометрию для изучения природы радиоактивности. Детальные поисковые работы сопровождаются горными работами (копанием канав, шурфов, штолен, шахт) и бурением скважин. В горных выработках и скважинах проводятся радиометрические работы.

Заключительным этапом специализированных работ является разведка рудопроявлений и месторождений с выполнением по густой сети бурения и горных работ с радиометрическими измерениями. Все этапы поисков радиоактивных руд сопровождаются лабораторными радиометрическими исследованиями.

Массовые (попутные) поиски радиоактивных руд не имеют строго выраженной этапности. Их задача заключается в том, чтобы все геологические маршруты, горные выработки и скважины сопровождалось изучением радиоактивности пород во избежание пропуска месторождений радиоактивных элементов.

1. Аэрометрическая и автомобильная съемки

Аэрогамма-съемка выполняется специализированными партиями, в составе которых имеются один или несколько летных отрядов и отряды наземной проверки аномалий.

Аппаратуру, настроенную в мастерской, устанавливают на самолет или вертолет, после чего эталонируют. В начале и в конце полетного дня выполняют полет по контрольному маршруту на высоте около 600 м для определения остаточного фона, сползания нуля и проведения калибровки диапазонов. Съемку осуществляют преимущественно по прямолинейным маршрутам, методика отработки которых описана в § 20. Аномалии повышенной радиоактивности детализируют маршрутами вкрест простирания до выхода в фоновые значения, затем выполняют маршрут по простиранию аномалии. Над эпицентром аномалии выполняют измерения при установке в приборе различных уровней дискриминации. Для обозначения аномалии на местности сбрасывают яркий вымпел, местоположение которого штурман отмечает на топопланшете. Производят предварительную оперативную оценку гамма-аномалий с помощью вертолетного отряда, состоящего из геолога и оператора. На легком вертолете МИ-1, где установлен радиометр с многопороговым дискриминатором, оперативный отряд отыскивает аномалию, уточняет ее положение, определяет ее природу. Отряд высаживается на несколько часов на участок аномалии, выполняет несколько наземных маршрутов, отыскивает с помощью пешеходного радиометра точки наибольшей радиоактивности, может сделать эманационные измерения, отбирает пробы. Полученный материал позволяет отбраковать аномалию (при наличии ее ториевой или калиевой природы) или рекомендовать ее к наземной проверке (если природа урановая).

Отряд наземной проверки состоит из геологов, операторов и забойщиков. Он оснащен полевой радиометрической, эманационной и спектрометрической аппаратурой и может иметь легкий буровой станок. Отряд высаживается на участок аномалии, находит ее по вымпелу и производит детальные поисковые работы, в результате которых аномалия отбраковывается или передается для предварительной разведки масштабов оруденения горно-буровыми работами.

Автомобильная гамма-съемка проводится по линиям параллельных маршрутов (в степных и пустынных местностях) или по одиночным маршрутам вдоль дорог. Привязка маршрутов выполняется с помощью топопланшета по характерным ориентирам местности. Автомобильный отряд оснащен пешеходным радиометром, эманометром, гамма-спектрометром. Выявленные аномалии оперативно детализируются, определяется их природа. Аномалии, представляющие интерес, передаются для наземной проверки специальному отряду.

Ленты, полученные при автомобильной и аэрогамма-съемках, обрабатываются с помощью палеток, на которых разбита эталонированная шкала в мкР/ч. В характерных точках графика на ленте отмечают интенсивность γ -излучения, точки переносят на топопланшет и по полученным значениям строят план изолиний радиоактивности. При обработке материалов аэрогамма-съемки полученные значения исправляют за высоту полета, т. е. приводят их к радиоактивности, которая наблюдалась бы на дневной поверхности (в случае пласта бесконечной мощности). Локальные аномалии при этом занижаются, ибо коэффициент их затухания с высотой значительно больше коэффициента затухания аномалии от безграничного пласта. Приведенные значения определяют по графику

$$J_{\text{пр}} = J_h k,$$

где J_h — интенсивность, полученная на высоте полета h , определяемой по радиовысотомеру; k — коэффициент приведения, зависящий от высоты полета.

2. Наземная пешеходная гамма-съемка

Наземная пешеходная гамма-съемка выполняется по определенной сети профилей или поисковых криволинейных маршрутов. В последнем варианте она часто сопровождает маршруты геологической съемки. Густота сети профилей определяется масштабом поисковых или геологосъемочных работ, а расстояние между точками отсчетов — масштабом (мощностью) ожидаемых зон оруденения. Обычно оно составляет 5, 10, 25 и 50 м. В точках отсчетов датчик прикладывают к земной поверхности. На интервалах между точками наблюдений оператор держит датчик на расстоянии 5—10 см от земной поверхности и непрерывно прослушивает частоту импульсов, а при наличии аномальных интенсивностей радиоактивного излучения берет отсчеты. В процессе съемки ведется прослушивание обнажений горных пород, даже если они удалены от маршрута (в пределах видимости). Встреченные аномалии детализируются по более густой сети профилей и точек. Оператор имеет эталонировочный график или таблицу, составленную по нему, и записанные отсчеты сразу же переводит в интенсивности в микрорентген в час. Перед началом и в конце рабочего дня оператор берет отсчеты на контрольной точке: фон пород, отсчет с сухим эталоном радия и отсчет с рабочим эталоном. В процессе съемки оператор систематически проверяет работу прибора по рабочему эталону. В случае расхождения двух контрольных отсчетов более чем на 10%, производится настройка и эталонировка прибора.

По результатам пешеходной площадной съемки строят планы изолиний радиоактивности; по результатам маршрутной съемки — графики изменения радиоактивности.

В аномальных точках гамма-активности выполняют наблюдения со спектрометром СП-3. С этой целью включают прибор, калибруют его по контрольному источнику ^{65}Zn , затем подносят датчик прибора к измеряемой поверхности и на трех энергетических интервалах (урана, тория и калия) берут отсчеты I_1 , I_2 и I_3 . Если скорость счета ниже 50 имп/с, то отсчеты берут по электро-механическому счетчику, определяя скорость счета по времени счета нескольких тысяч импульсов. Содержание урана, тория и калия (в %) вычисляют по формулам

$$\begin{aligned} C_U &= A_1 I_1 + B_1 I_2 + C_1 I_3, \\ C_{\text{Th}} &= A_2 I_1 + B_2 I_2 + C_2 I_3, \\ C_K &= A_3 I_1 + B_3 I_2 + C_3 I_3, \end{aligned}$$

где A_i, B_i, C_i ($i = 1, 2, 3$) — коэффициенты, указанные в паспорте прибора.

3. Полевая эманационная съемка

Эманационные измерения выполняют, как правило, на участках детальных работ как по отдельным профилям, так и по системе профилей. Расстояние между точками колеблется от 10 до 1 м. Работу выполняют оператор и один или несколько (если применяют несколько пробоотборников) рабочих. Во всех точках наблюдений оператор берет отсчеты мгновенных значений J_0 ; перед измерением на точке он записывает величину фона J_ϕ , затем подсоединяет к камере шланг от пробоотборника (который рабочий установил в шпур), делает несколько качков насосом, берет и записывает отсчет J_0 . Разницу $J_0 - J_\phi$ он умножает на цену деления и записывает концентрацию радона в эманах, далее отключает от камеры шланг и вентилирует ее путем нескольких качков насоса.

В аномальных точках определяют природу эманации (радон, торон). Торон и продукт его распада TnA имеют малые периоды полураспада (54,5 и 0,16 с). Это приводит к тому, что интенсивность α -излучения от Tn и TnA резко убывает после введения его в камеру и через 5 мин практически равна нулю. Радон и продукт его распада α -излучатель RaA имеют сравнительно большие периоды полураспада (3,825 сут и 3,05 мин). Вследствие этого интенсивность α -излучения в камере начинает расти, через 3 ч она достигает максимума и становится в 2,7 раза больше по сравнению с интенсивностью α -излучения только что введенного радона. Если после закачки эманации в камеру клапан ее закрыть, взять отсчет n_0 и через интервал времени t взять отсчет n_t в эманах, то концентрации Rn и Tn можно вычислить по формулам

$$C_{\text{Rn}} = an_t - bn_0; \quad C_{\text{Tn}} = n_0 - C_{\text{Rn}},$$

где a и b — коэффициенты, которые можно вычислить теоретически.

Так, при $t = 3$ и 5 мин коэффициент a (по Ю. П. Булашевичу) равен приблизительно $0,71$ и $0,65$; b практически равен нулю.

Результаты съемки представляют в виде графиков или планов изоэман и наносят на них точки раздельного определения радона и торона, подписывая концентрации последних. Повышенная концентрация радона в общем объеме эманации указывает на наличие поблизости от нее источников и спутников-элементов ряда урана.

4. Измерение радиоактивности пород в горных выработках

В горных выработках (в канавах, шурфах, шахтах, штольнях) выполняется непрерывное их прослушивание и взятие отсчетов в точках наблюдений, густота которых определяется результатами прослушивания. Дно канав прослушивается по системе Z-ходов, а затем измеряется по одному — двум профилям с точками через $0,25$ — 1 м. Коренные породы в стенках канав прослушивают и измеряют по профилям, находящимся на расстоянии $0,5$ — 1 м. В шурфах и шахтах прослушивают стенки по отдельным профилям через $0,25$ — 1 м или Z-ходами, забой — по двум взаимно перпендикулярным профилям. В штольнях выполняют прослушивание и измерение по кровле, стенкам и забою через $0,5$ — 1 м.

На результаты гамма-измерений в любой точке выработки оказывает влияние γ -излучение окружающих пород, особенно при их высокой радиоактивности. Для ослабления этого влияния на гильзу радиометра надевают свинцовый цилиндрический экран. Это позволяет более точно оконтурить участки с разной аномальной гамма-активностью.

Результаты измерений представляют в виде графиков интенсивности излучений пород в выработках (канавы, штольни, шахты), или в виде планов изолиний интенсивности излучения пород стенок, совмещенных с их геологическими зарисовками.

На зарисовках выработок, имеющих низкую радиоактивность, аномальные участки показывают кружками разного цвета или размера или цифрой аномальной интенсивности.

Излучение радиоактивных веществ в горных породах выработок, радиоактивная пыль и эманации создают опасные условия для работы людей. Поэтому продолжительность измерений в горных выработках не должна превышать времени получения предельно допустимой дозы облучения. Чтобы уменьшить опасность радиоактивных эманаций, выработки должны быть оснащены надежной системой вентиляции.

В целях предотвращения попадания внутрь организма радиоактивной пыли необходимо пользоваться респиратором. В горных выработках запрещается курить и принимать пищу.

5. Измерение радиоактивности проб воды в полевых условиях

В полевых условиях радиоактивность проб воды измеряют эманометром, определяя при этом количество и концентрацию в пробе радона и радия (в г/л). Перед измерением пробу помещают в герметичный барботер и ставят для накопления радона на несколько дней. Затем выполняют те же работы, что и при эталонировании прибора. В соответствии с формулой (29) количество радона (в Ки) в камере эманометра

$$Q_{Rn} = \frac{n_{34k}}{2,7},$$

следовательно, количество радия в пробе (в г)

$$Q_{Ra} = \frac{C_{Rn} V \cdot 10^{-10}}{2,7 (1 - e^{-\lambda t})}.$$

Концентрация в пробе радия (в г/л) определится в результате деления Q_{Ra} на объем пробы. Концентрация радона в пробе в момент определения равна $C_{Rn} = Q_{Rn} : V$, концентрация радона в момент взятия ее из источника $C_{oRn} = C_{tRn} / e^{-\lambda \Delta t}$, где Δt — время, прошедшее с момента взятия пробы до момента измерения.

6. Лабораторные методы исследования радиоактивности проб

Лабораторные исследования проб с помощью аппаратуры РАП-1, ЛАС, ЛСУ-5к и РАЛ-1 позволяют определить содержание равновесных и неравновесных урана, тория, радия, калия.

В смешанных ураново-ториевых рудах с равновесным содержанием урана с помощью установки РАП-1 можно определить содержание урана и тория. Определение основано на том, что общая γ -интенсивность складывается из влияния урана и тория, жесткая составляющая (измеренная с некоторым порогом дискриминации) определяется в основном излучением ряда тория. В исследуемой пробе измеряют общую интенсивность J_0 и интенсивность J_n излучения с энергиями выше порога 2 МэВ. Составляют уравнения

$$J_0 = C_U + AC_{Th}; \quad J_n = C_U + BC_{Th}.$$

Из приведенной системы

$$\begin{aligned} C_U &= \frac{B}{B-A} J_0 - \frac{A}{B-A} J_n, \\ C_{Th} &= \frac{1}{B-A} (J_n - J_0). \end{aligned} \quad (30)$$

Коэффициенты A и B определяют путем аналогичных измерений с эталонными пробами. Точность определения соответствует концентрации урана порядка нескольких сотых процента для пробы массой 100 г.

Содержание урана и тория в сложных равновесных рудах можно определить и путем гамма-бета-измерений проб на установках типа ЛАС и ЛСУ-5к.

Формулы для определения C_U и C_{Th} имеют такой же вид, как в системе (30), однако с другими условными обозначениями: J_0 — отсчет по бета-каналу; J_n — отсчет по гамма-каналу; A и B — урановые эквиваленты равновесного тория по β - и γ -излучению

$$A = \frac{J_{Th}^{\beta} C_U}{J_U^{\beta} C_{Th}}; \quad B = \frac{J_{Th}^{\gamma} C_U p_U}{J_U^{\gamma} C_{Th} p_{Th}},$$

где J_{Th}^{β} , J_U^{β} и J_{Th}^{γ} , J_U^{γ} — скорости счета с эталонами равновесного урана и тория соответственно по β - и γ -излучениям; p_U и p_{Th} — массы эталонных проб урана и тория.

При выполнении указанных определений с приборами ЛАС и ЛСУ-5к в каналах устанавливается пороговая дискриминация с уровнем шумовых импульсов.

Методика комплексного измерения γ - и β -излучений проб позволяет определить содержание урана в неравновесных урановых рудах. С этой целью также измеряется интенсивность J_{β} и J_{γ} излучения пробы, после чего находится содержание урана

$$C_U = \frac{n}{n-b} J_{\beta} - \frac{b}{n-b} J_{\gamma},$$

где n и b — коэффициенты, определяемые по эталонным пробам равновесного и неравновесного (оксида — закиси) урана.

При измерении одновременно интенсивности общего J_0 и жесткого J_n γ -излучения, а также интенсивности J_{β} β -излучения приборами ЛАС и ЛСУ-5к имеется возможность в сложных рудах с неравновесным ураном определять содержания урана, радия и тория:

$$C_U = A_1 J_0 + B_1 J_n + C_1 J_{\beta};$$

$$C_{Ra} = A_2 J_0 + B_2 J_n + C_2 J_{\beta};$$

$$C_{Th} = A_3 J_0 + B_3 J_n + C_3 J_{\beta}.$$

Коэффициенты A_i , B_i , C_i ($i = 1, 2, 3$) зависят от коэффициентов a_i , b_i , c_i и находятся из системы уравнений

$$J_0 = a_1 C_U + b_1 C_{Ra} + c_1 C_{Th};$$

$$J_n = a_2 C_U + b_2 C_{Ra} + c_2 C_{Th};$$

$$J_{\beta} = a_3 C_U + b_3 C_{Ra} + c_3 C_{Th},$$

где a_i , b_i , c_i — коэффициенты, получаемые при эталонировании с помощью проб неравновесного урана (U_3O_8), равновесного урана и тория в интервалах общего и жесткого γ -излучений, а также общего β -излучения.

Измеряя на трех энергетических интервалах (урановом, ториевом и калиевом) установки ЛСУ-5к γ -излучение, а также β -излучение проб, можно определить содержание урана, радия, тория и калия.

С помощью прибора РАЛ-1 путем измерения интенсивности α -излучений порошковой пробы и эталона определяют содержание равновесного урана, кроме того, с помощью камеры выполняют измерение концентрации радона и торона в воздухе и в жидкости по такой же методике, что и эманометром ЭМ-6П.

Лабораторные работы должны выполняться с соблюдением правил техники безопасности в обращении с эталонами и радиоактивными веществами. Правила обращения с радиоактивными веществами такие же, что и с эталонами радиоактивности.

Работа ведется в специализированных лабораториях, где систематически осуществляется дозиметрический контроль работающего персонала, производственных помещений, рабочих мест.

§ 56. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ И ПОИСКАХ НЕРАДИОАКТИВНЫХ РУД

При геологическом картировании с помощью радиометрических методов определяют абсолютный возраст геологических образований, контакты горных пород различной радиоактивности, прослеживают зоны тектонических нарушений и решают другие задачи.

Определение абсолютного возраста горных пород основано на том, что распад радиоактивных элементов происходит в природе с постоянной скоростью, независимо от изменения давления, температуры и других условий окружающей среды. Обычно используют ядерные превращения урана и тория в свинец и гелий (свинцовый и гелиевый методы), аргона в калий (аргоновый метод), рубидия в стронций (стронциевый метод).

Для определения абсолютного возраста свинцовым методом отбирают уранинит, монацит, ортит и другие минералы, имеющие хорошую сохранность и содержащие более 1% урана или тория. Если в минерале содержится только уран, то по закону превращения радиоактивного вещества

$$N_t^U = N_0^U e^{-\lambda_U t},$$

где N_0^U — число атомов урана в минерале во время его образования; N_t^U — число нераспавшихся атомов урана в момент измерения; λ_U — постоянная распада урана.

Поскольку суммарное число оставшихся атомов урана и образующихся атомов свинца N_i^{Pb} остается неизменным, то

$$N_i^{Pb} = N_i^U (e^{\lambda_U t} - 1).$$

При $t \leq 2 \cdot 10^8$ лет решение этого уравнения относительно t приводит к формуле

$$t \approx \frac{1,455}{\lambda} \cdot \frac{Q_{Pb}}{Q_U},$$

где Q_{Pb} и Q_U — количества свинца и урана, определенные химическим анализом.

При $t > 2 \cdot 10^8$ лет формула выглядит сложнее.

Подобным образом определяют абсолютный возраст пород другими методами. Возраст, определенный по гелиевому методу, обычно занижен, так как накапливающийся в минералах гелий создает давление и по микротрещинам выходит в окружающее пространство. Поэтому для гелиевого метода берут минералы с небольшим содержанием радиоактивных элементов (кристаллы железа, меди, платины). Для аргонового метода отбирают мусковит, биотит, для стронциевого — лепидолит, биотит, мусковит и другие минералы хорошей сохранности.

Контакты горных пород различной радиоактивности, выходящих на дневную поверхность, определяют по результатам воздушной, автомобильной и наземной гамма-съемки. На участках с небольшой мощностью наносов (5—10 м) эта задача решается с помощью эманационной съемки, гамма- или бета-съемки в шпурах. Повышенной радиоактивностью выделяются кислые изверженные породы, углистые сланцы, конгломераты, глины и глинистые сланцы, содержащие радиоактивные элементы и другие горные породы. Расчленение горных пород по их естественной радиоактивности широко применяют при изучении разрезов нефтяных и газовых скважин.

В трещинных зонах горных пород обычно циркулируют подземные воды, которые могут содержать растворенный в небольшой концентрации радон. Выделяясь по трещинам в покровные рыхлые отложения, он образует ореолы, которые могут быть зафиксированы эманационной съемкой. Таким методом можно обнаружить и проследить зону тектонического нарушения.

Радиометрические методы применяются при поисках и разведке фосфорита, калийных солей, углей и других полезных ископаемых, в которых часто присутствует уран. Поиски ведутся гамма-методом в воздушном и наземном вариантах, а также γ -, β - и эманационными методами в наземном варианте и при проходке горных выработок и скважин.

Сеть радиометрических наблюдений при геологическом картировании и поисках определяется масштабом геологической съемки, размерами месторождений и ореолов повышенной радиоактивности, которые они образуют.

При поисках и разведке месторождений нерадиоактивных полезных ископаемых широко применяются ядерные методы. Они основаны на наблюдении эффектов взаимодействия искусственных источников γ - или нейтронного излучения на атомы нерадиоактивных элементов. Такими эффектами могут быть различные виды излучений (γ -, β -, α -, нейтронное и рентгеновское излучения), рассеяние или ослабление первичного излучения. Величина определяемого эффекта зависит от вещественного состава горных по-

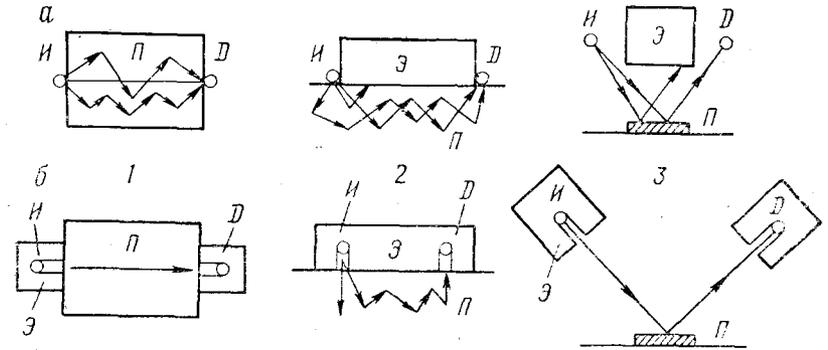


Рис. 90. Схема установок, применяемых в ядерно-геофизических методах а — с широкими пучками излучения, б — с коллимированными пучками; интенсивность излучения, обусловленная эффектом: 1 — прохождения лучей через пробу, 2 — многократного рассеяния первичного излучения, 3 — однократного рассеянного излучения

род и руд и содержания в них того или иного элемента. Поскольку теоретически установить эту зависимость для разнообразных условий очень трудно, качественный и количественный анализы вещественного состава пород и руд ведутся путем сравнения измеряемого эффекта пробы с эффектом эталонов.

В ядерно-геофизических методах применяют источник I (рис. 90) первичного радиоактивного излучения и датчик D регистрируемого эффекта. Между ними помещают исследуемую пробу P . Для того, чтобы прямое излучение не оказывало воздействия на датчик, между ним и источником помещают свинцовые экраны \mathcal{E} . Датчик измеряет интенсивность излучения, обусловленную или эффектом ослабления излучения при прохождении через пробу P (случай 1), эффектом отражения многократно-рассеянного излучения (случай 2) или отражения преимущественно однократно-рассеянного излучения (случай 3), когда со стороны детектора видна часть поверхности, облучаемая источником. Измерение выполняется как с широкими пучками излучения (а), так и с коллимированными пучками (б). Применение коллимированных пучков позволяет повысить точность определения

измеряемых параметров, поскольку установленные зависимости перечисленных эффектов от физических параметров пробы наиболее четко проявляются для узких пучков излучения.

Расстояние между источником и датчиком называют базой прибора или длиной зонда (в каротаже).

Проникающая способность радиоактивных излучений мала, поэтому ядерные методы позволяют изучать физические параметры среды лишь в поверхностном слое пробы, толщина которого в зависимости от вида и энергии вторичного или ослабленного излучения колеблется от сотых долей миллиметра до 20—30 см.

По типу применяемых источников искусственного излучения различают гамма-методы и нейтронные методы.

1. Гамма-методы

При прохождении через горную породу γ -квантов с энергией менее 0,2—0,3 МэВ происходит их фотопоглощение, поэтому интенсивность первичного γ -излучения ослабляется. Ослабление пропорционально примерно атомному номеру элемента, возведенному в четвертую степень. На использовании этого явления основан селективный гамма-гамма-метод (ГГМ-С) определения в горных породах железа, свинца, ртути и других тяжелых элементов. Поскольку вероятность фотоэлектрического поглощения возрастает с уменьшением энергии γ -квантов, в данном методе применяют источники мягкого излучения, например, ^{75}Se (0,138 и 0,269 МэВ). Гильза детектора изготавливается из алюминия, пластмассы или другого материала с небольшим атомным номером, чтобы была возможность регистрировать мягкое γ -излучение с энергией до 0,1 МэВ. В полевом и скважинном вариантах метода применяют схему измерения 2, а для исследования порошковых проб — схему 3 (см. рис. 90). Для определения тяжелых элементов в горных выработках и скважинах подземного бурения глубиной до 50 м и в шпурах применяют прибор РСР-2. В его комплект входят скважинный прибор и датчик для измерения в горных выработках и на порошковых пробах.

При облучении горных пород γ -квантами с энергией ниже 1 МэВ происходит их рассеяние и поглощение по эффекту Комптона. Интенсивность J_p рассеянных γ -квантов с энергией 0,3—1 МэВ находится в обратной зависимости от плотности облучаемой среды. На этом явлении основан гамма-гамма-метод определения плотности горных пород (ГГМ-П) в полевых и скважинных условиях.

В методе применяют схему измерений 2 (см. рис. 90). На интенсивность вторичного гамма-излучения влияет база прибора (или длина зонда). При увеличении длины зонда L до размеров и н-версионного зонда¹ интенсивность J_p находится в прямой зависимости от плотности облучаемой среды за счет γ -квантов,

¹ Зонд небольшого размера $L_n = 15 \div 20$ см, на результаты измерения которым слабо сказывается изменение содержания водорода в породах.

образуемых при фотоэлектрическом эффекте. При $L > L_n$ величина J_p начинает уменьшаться по мере увеличения плотности. Зонд при $L \ll L_n$ называется доинверсионным, а при $L > L_n$ — заинверсионным. Обычно измерение ведут при $L > L_n$, когда величина J_p находится в обратной зависимости от плотности горных пород. Для измерения плотности пород в естественном залегании применяется скинтилляционный гамма-плотномер переносный СГПП. В качестве источника γ -излучения применяется ^{137}Cs с энергией 3,5 МэВ. База прибора $L = 17$ см. Гамма-кванты, попадая в горную породу, ослабляются до энергий 1 МэВ, рассеиваются по Комптон-эффекту, и часть их регистрируется датчиком. Плотность измеряется в пределах от 1 до 3,5 г/см³ с погрешностью не более 0,05 г/см³.

При фотопоглощении мягкого (менее 0,1 МэВ) γ -излучения электронными оболочками атома электроны могут переходить с одной орбиты на другую. Возвращение их на первоначальную орбиту сопровождается испусканием фотонов так называемого характеристического рентгеновского излучения. Его энергия возрастает с увеличением атомного номера возбуждаемого элемента и равна разности энергетических уровней электрона при нахождении его на первоначальной орбите и на орбите, на которую он перешел при возбуждении атома. Это явление лежит в основе рентгено-радиометрического метода определения большого числа элементов (цинка, молибдена, олова, свинца, ртути и др.), применяемого в лабораторных и полевых условиях.

В полевых лабораторных условиях и для измерений на стенках горных выработок используют анализаторы серии «Минерал», работающие по схеме 3, б (см. рис. 90), с применением в качестве источников возбуждающего мягкого излучения изотопов ^{170}Tm (0,084 МэВ), ^{204}Tl и др.

В процессе фотоэлектрического поглощения γ -квантов они выбивают из электронных оболочек атомов облучаемого вещества фотоэлектроны. Интенсивность их излучения для тяжелых элементов (Pb, Hg, Cu и др.) пропорциональна Z^4 . На регистрации этих фотоэлектронов основан гамма-электронный (эмиссионный) метод анализа, используемый в лабораторных условиях. Источниками излучения служат изотопы мягкого излучения ^{75}Se (с энергией 0,265 МэВ) и др. Альфа-излучение измеряют спектрометрами с применением счетчиков α -излучения. Поскольку фотопоглощение сопровождается γ -излучением, для ослабления его влияния при измерениях часто используют ионизационную камеру, в которой γ -излучение создает незначительный фон. Для устранения влияния характеристического излучения, кроме эталона определяемого элемента, применяют фоновый эталон. Он имеет такой же состав, что и исследуемая проба, но не содержит измеряемого элемента. Разница в показаниях при исследованиях с пробой и фоновым эталоном равна интенсивности, связанной с электронным излучением элемента.

При воздействии жесткого γ -излучения (более 1,66 МэВ) на ядро атома возникает нейтронное излучение. На регистрации его основан гамма-нейтронный (фотонейтронный) метод анализа проб, применяемый как в лабораторных, так и в полевых условиях. С помощью этого метода определяют содержание бериллия, на ядрах которого фотонейтронная реакция протекает наиболее интенсивно. Источником γ -излучения является обычно ^{124}Sb — с энергиями 1,7 и 2,1 МэВ. Для лабораторных условий применяется специальная аппаратура «Берилл-2» и др. Разработаны и полевые бериллометры для измерений нейтронного излучения в условиях естественного залегания.

При измерениях с лабораторными установками пробу засыпают в алюминиевый стакан с двойными стенками, в центре которого находится источник γ -излучения. Стакан помещают в парафиновый блок, замедляющий образующиеся быстрые нейтроны до медленных, которые регистрируются установленным в блоке счетчиком нейтронного излучения. В полевом бериллометре источник излучения находится в нижней части датчика, который устанавливают на поверхности измеряемой горной породы.

2. Нейтронные методы

В нейтронных методах генераторами нейтронов служат радий-бериллиевые, полоний-бериллиевые источники, а также управляемые источники нейтронов.

В радий-бериллиевом источнике нейтроны образуются при бомбардировке ядер бериллия α -частицами радия по реакции



Энергия потока нейтронов составляет 1,9—8,9 МэВ. Мощность источника определяется числом нейтронов, излучаемых в 1 с на 1 г Ra. Реакция сопровождается также интенсивным жестким γ -излучением.

В полоний-бериллиевом источнике ядра бериллия бомбардируются α -частицами полония. Энергия нейтронов такая же, что и у радий-бериллиевого источника. Реакция сопровождается слабым мягким γ -излучением. Поскольку период полураспада полония невелик (138 сут), активность источника быстро уменьшается и требует постоянного учета.

В управляемом генераторе нейтронов в пространстве между анодом и катодом находится газообразный дейтерий. Анод представляет собой тритиевую мишень. При большой разности потенциалов (порядка 100 кВ) ионизированные ядра дейтерия устремляются к тритиевой мишени, где происходит ядерная реакция



Энергия излучаемых нейтронов приблизительно 14 МэВ.

Поскольку между анодом и катодом приложено переменное напряжение, нейтроны генерируются в виде импульсов.

Наиболее безопасен при работе управляемый генератор нейтронов, но для него необходимы специальные источники питания. Безопасным является также полоний-бериллиевый источник, поскольку при удалении препарата полония от бериллия нейтронное излучение исчезает, а γ -излучение полония опасности не представляет. Наиболее опасен в работе радиево-бериллиевый источник, поскольку радий дает мощное γ -излучение. Активность этого источника стабильна во времени, что является его преимуществом.

Нейтроны в зависимости от их энергии подразделяют на быстрые (20—0,2 МэВ), промежуточные (0,2—0,05 МэВ), медленные (10—0,25 эВ), тепловые ($\approx 0,025$ эВ). Скорость движения их уменьшается от быстрых к тепловым от $1,4 \cdot 10^9$ до $4,4 \cdot 10^4$ см/с.

В методах ядерной геофизики используются следующие процессы взаимодействия нейтронов с ядрами атомов: упругое и неупругое рассеяния, радиационный захват, ядерное расщепление.

Упругое и неупругое рассеяния характерны для быстрых нейтронов. В упругом рассеянии нейтрон при столкновении с ядром передает ему часть энергии E_0 , замедляется и отклоняется от первоначального направления на некоторый угол φ . Потеря энергии

$$\Delta E = \frac{4A}{(A+1)^2} E_0 \cos^2 \varphi,$$

где A — отношение масс ядра атома и нейтрона.

Приведенная формула показывает, что величина ΔE возрастает с уменьшением массы бомбардируемого атома. Поэтому упругое рассеяние и, следовательно, замедление нейтронов наиболее интенсивно происходят на ядрах легких атомов. Хорошими замедлителями являются вода, парафин, органические жидкости и другие водородсодержащие вещества. Ядра тяжелых элементов (свинца и т. д.) легко проникаемы для быстрых нейтронов.

Нейтроны с энергиями более 1 МэВ при взаимодействии с легкими ядрами и нейтроны с энергиями более 0,6 МэВ при взаимодействии с тяжелыми ядрами испытывают неупругое рассеяние, при котором часть кинетической энергии нейтрона расходуется на возбуждение ядра. Переход его в невозбужденное состояние сопровождается γ -излучением. При взаимодействии тепловых и медленных нейтронов с энергией около 10 эВ происходит радиационный захват нейтрона ядром. Ядро переходит в возбужденное состояние и становится радиоактивным изотопом стабильного элемента. Этот переход сопровождается γ -излучением.

Ядерное расщепление возникает при взаимодействии с ядром нейтронов с энергией более 2 МэВ. Ядро поглощает нейтрон и испускает α -частицу. В результате этой реакции часто возникают радиоактивные изотопы.

В ядерно-геофизических методах явление упругого рассеяния используется в замедлителях нейтронов, которые бывают необходимы при измерениях. Часто в качестве замедлителей применяют парафин или воду.

На ослаблении плотности потока тепловых нейтронов вследствие явления радиационного захвата основан нейтрон-нейтронный (нейтрон-абсорбционный) метод. Вероятность захвата нейтрона ядром выражают сечением захвата ядра, которое измеряют в барнах ($1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Наибольшим сечением захвата обладают бор, хлор, ртуть, литий, кадмий и ряд других элементов. Для определения их концентрации в горных породах и предназначен данный метод. Он применяется в лабораторном, полевом и скважинном вариантах.

В лабораторной установке «Нейтрон-2» (рис. 91) полоний-бериллиевый источник нейтронов 1 находится в полусферическом

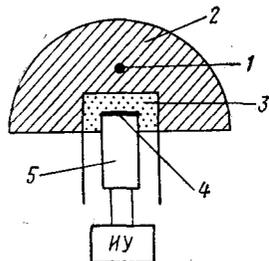


Рис. 91. Схема установки «Нейтрон»

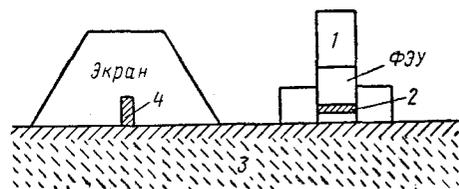


Рис. 92. Схема установки борметра

парафиновом замедлителе 2. Изучаемая порошковая проба 3 помещается в стакане между замедлителем и детектором медленных нейтронов. Нейтроны замедляются в парафине до тепловых энергий, пройдя через пробу, ослабляются, воспринимаются детектором, состоящим из люминофора 4 и фотоэлектронного умножителя 5. Плотность потока их определяется с помощью измерительного устройства ИУ.

Для полевых измерений заслуживает внимания борметр (рис. 92), изготовленный на базе прибора СРП-2. Нейтроны, излучаемые источником 4, замедляясь в парафине, проникают в среду 3, где происходит ослабление их потока. Этот поток воспринимается пластиной 2, изготовленной из смеси $Zn(Ag)$ с соединениями бора, и измеряется прибором СРП-2 (1).

Чем выше концентрация в породах бора, тем меньше будет регистрируемая датчиком плотность нейтронов.

На измерении γ -излучения радиационного захвата основан нейтронно-гамма-метод (НГМ), разработанный для скважинных исследований.

В процессах неупругого рассеяния и радиационного захвата образуются радиоактивные изотопы, каждый из которых характеризуется определенным периодом полураспада, видом и энергией излучения. На измерении интенсивности излучения изотопов основан нейтронно-активационный анализ (метод наведенной активности). Процесс образования радиоактивных изотопов атомов

стабильных элементов под воздействием излучения, в данном случае нейтронного, называется активацией.

Активность облученной пробы пропорциональна сечению активации, плотности потока нейтронов, массе облученного элемента, процентному содержанию его в пробе. Она зависит от соотношения времени облучения пробы и постоянной распада изотопа. Сечение активации определяет вероятность образования радиоизотопа и измеряется в барнах. При активации медленными нейтронами оно обратно пропорционально квадратному корню из энергии нейтронов. Активность пробы растет с увеличением времени активации до трех-четырех периодов полураспада изотопа. Дальнейшее облучение обычно не повышает активность, поскольку полученный изотоп распадается.

Метод наведенной активности разработан для лабораторных и скважинных условий и применяется при определении содержания меди, марганца, алюминия и других элементов. Методика работ заключается в активации источником нейтронов вещества и последующего измерения β - или γ -излучения (в лабораторных условиях) или только γ -излучения (в скважине).

Обычно наведенная активность обусловлена суммой активностей всех образовавшихся изотопов. Чтобы из этой суммы выделить активность, вызванную изотопом измеряемого элемента, используют различие изотопов по энергиям излучения, применяя спектрометры, или по периодам полураспада, измеряя активность во времени. Так, изотопы ^{64}Cu и ^{42}K , имеющих близкие периоды полураспада, можно разделить по энергиям γ -излучения (0,51 и 1,51 МэВ).

Описанные примеры далеко не исчерпывают области применения ядерно-геофизических методов. По мере проникновения в сущность ядерных превращений растет число методов, увеличивается перечень определяемых элементов, повышается точность исследований. По сравнению с химическими и другими видами анализов ядерно-геофизические измерения имеют преимущества: они не ведут к уничтожению пробы, отличаются простотой и экспрессностью.

При выполнении ядерно-геофизических методов применяют источники, создающие высокую интенсивность γ - или нейтронного излучения. Поэтому при обращении с источниками необходимо соблюдать основные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений [7]. Источники γ -излучений перевозят и хранят в специальных свинцовых контейнерах, а источники нейтронов (радий-бериллиевые) — в контейнерах с парафиновым замедлителем. Переноска источников при работе выполняется также в специальных контейнерах, ослабляющих интенсивность излучения. При необходимости применяются дистанционные приспособления.

Время облучения человека источником при работе должно определяться в каждом конкретном случае, исходя из предельно допустимых доз облучения.

ГЛАВА VI СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА

Сейсмическая разведка включает совокупность методов для изучения глубинного строения земной коры. Методы сейсморазведки основаны на изучении распространения в земной коре упругих волн, возбуждаемых искусственным путем.

Упругие волны распространяются на большую глубину в толщу земной коры. На границах, разделяющих горные породы разного состава, упругие волны отражаются и преломляются и частично возвращаются к поверхности земли. Изучая время распространения волн и характер колебаний почвы, где установлены приемники упругих колебаний, определяют глубину и форму границ неоднородностей, скорости распространения волн, которые зависят от литологического состава горных пород.

Сейсморазведка применяется в основном для решения задач структурной геологии и поисков месторождений полезных ископаемых (нефть, газ, уголь, каменная соль), которые связаны с определенными структурами. Сейсморазведку применяют и для решения различных гидрогеологических и инженерно-геологических задач.

§ 58. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ УПРУГИХ ВОЛН И КОЛЕБАНИЙ

В реальных геологических средах могут возникать и распространяться упругие волны различных типов. Особенности распространения упругих волн в сложных реальных средах во многом сходны с особенностями и законами распространения волн в абсолютно упругих средах.

Процессы возникновения и распространения упругих волн тесно связаны с упругими деформациями горных пород.

Деформацией тела называют изменение его формы или размеров под воздействием внешних сил. Любое тело (твердое, жидкое, газообразное) под действием приложенных к нему сил может испытывать сжатие, растяжение, сдвиг и другие виды деформаций.

Тело называют **упругим**, если под действием приложенных к нему сил оно деформируется, а после прекращения действия сил мгновенно возвращается в исходное состояние. Деформация такого тела называется **упругой**. Тело и его деформации называют **пластичными**, если при устранении действующих на него внешних сил оно не возвращается в исходное состояние или возвращается постепенно.

Если упругое деформированное тело мысленно расщечь на две части, то одна из них будет действовать на другую с некоторыми силами, которые называют внутренними упругими силами. Сила, действующая в упругом теле на единицу площади его поперечного сечения в определенном направлении, называется **напряжением**.

Напряжения, направленные нормально или по касательной к действующим на тело внешним силам, называют соответственно **нормальными** или **касательными** напряжениями деформированного тела. При незначительных деформациях, согласно закону Гука, относительная величина деформации пропорциональна величине напряжений.

Если к свободному концу закрепленного к поверхности 2 (рис. 93, а) цилиндрического бруса 1 длиной L , диаметром D и площадью поперечного сечения S приложить растягивающую силу F , то брус будет находиться под напряжением и поэтому удлинится на величину ΔL и уменьшится в диаметре на величину ΔD .

Отношения $\Delta L/L$ и $\Delta D/D$ называют соответственно относительным продольным удлинением и относительным поперечным сжатием.

Величина касательного напряжения P , действующего на единицу площади S поперечного сечения бруса, равна

$$P = F/S.$$

Согласно закону Гука,

$$P = E \frac{\Delta L}{L},$$

где E — коэффициент пропорциональности, называемый **модулем продольного растяжения** (модуль Юнга), кгс/см².

Между относительным продольным удлинением и поперечным сжатием упругих тел справедливо соотношение

$$\frac{\Delta D}{D} = \mu \frac{\Delta L}{L},$$

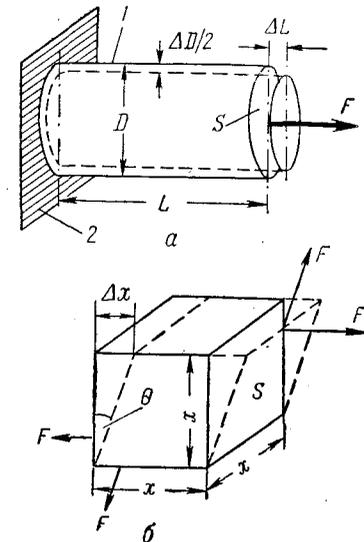


Рис. 93. Деформации растяжения (а) и сдвига (б)

где μ — безразмерный коэффициент пропорциональности, называемый модулем поперечного сжатия (коэффициент Пуассона).

Величины E и μ не зависят от размеров и формы тела, а также друг от друга. Они характеризуют упругие свойства вещества. Упругие свойства любого изотропного упругого тела полностью определяются величинами E и μ .

Деформация, при которой все слои тела, параллельные некоторой плоскости, не искривляясь и не изменяясь в размерах, смещаются параллельно друг другу, называется сдвигом. Обычно сдвиг вызывается двумя парами сил F (рис. 93, б), приложенных по касательным к противоположным граням тела. Отношение $\Delta x/x$ называют относительным сдвигом, а угол θ — углом сдвига. При незначительной деформации

$$\theta \approx \operatorname{tg} \theta \approx \frac{\Delta x}{x},$$

поэтому угол θ часто называют также относительным сдвигом.

Согласно закону Гука, относительный сдвиг пропорционален касательному напряжению T , равному F/S , т. е.

$$T = G\theta,$$

где G — коэффициент пропорциональности, называемый модулем сдвига, кгс/см².

Модули сдвига, Юнга и коэффициент Пуассона связаны соотношением

$$G = \frac{E}{2(\mu + 1)}.$$

Закон Гука справедлив для большинства горных пород, если деформации и напряжения не слишком велики. Поэтому выводы, вытекающие из этого закона, можно использовать в сейсморазведке лишь для областей, расположенных на некотором удалении от места взрыва, где деформации оказываются достаточно малыми. Вблизи области взрыва, где возникают колоссальные напряжения, закон Гука неприменим.

1. Продольные и поперечные волны

Предположим, что внешняя возбуждающая сила, действующая в какой-либо небольшой области O (рис. 94, а) безграничной упругой среды, имеет вид импульса, т. е. быстро изменяется с течением времени. По закону Гука, в этой области образуются также изменяющиеся со временем деформации, с которыми связано перемещение частиц среды. Перемещение частиц вызовет изменение напряжений в слое I , окружающем первоначальную область возбуждения. Под действием переменных напряжений в этом

слое возникнут деформации, изменяющиеся со временем. Частицы слоя I , перемещаясь, создадут изменяющееся напряжение в следующем слое II , и т. д. От области возбуждения во всех направлениях постепенно распространяется изменение первоначального состояния деформаций и напряжений в виде импульса.

Обычно изменение возбуждающей силы происходит в различных направлениях. Она вначале быстро возрастает, а затем

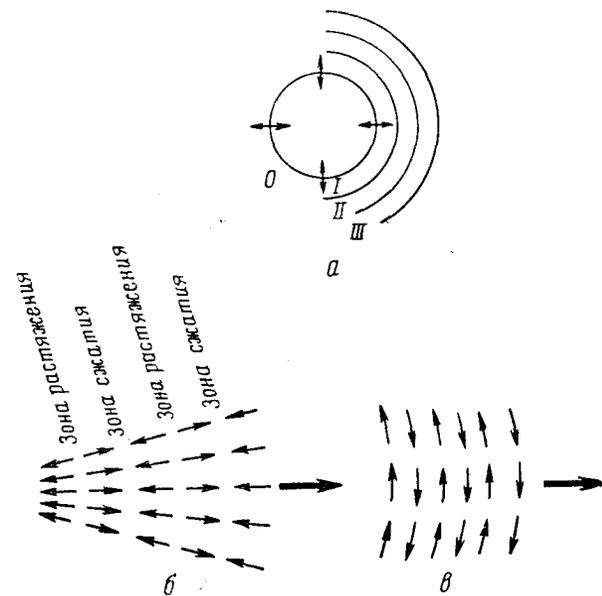


Рис. 94. Схема возникновения упругих волн (а) и направление смещения частиц в слоях среды при распространении продольных (б) и поперечных (в) волн

убывает. Поэтому происходит изменение направления деформаций и связанных с ними перемещений частиц среды: частицы совершают кратковременные колебания вокруг точек своего первоначального положения. Перемещения частиц постепенно передаются от одной частицы к другой, и с течением времени колебания происходят на все большем расстоянии от области первоначального действия силы. Через среду проходит так называемая упругая волна, которая распространяется с некоторой конечной скоростью, зависящей от упругих постоянных и плотности среды.

В безграничной упругой среде могут существовать продольные и поперечные волны. Упругая волна, связанная с деформациями сжатия и растяжения, представляет собой чередующийся ряд зон сжатия и растяжения (рис. 94, б).

Частицы совершают колебания относительно своего первоначального положения в направлении, совпадающем с направлением распространения волны (вдоль волны). Поэтому такая волна называется *продольной* и обозначается *P*. Продольные волны могут возникать в газообразной, жидкой и твердой средах.

Упругая волна, связанная с деформацией сдвига, называется *поперечной* и обозначается *S*.

В колебаниях сдвига происходит как бы скольжение слоев упругой среды относительно друг друга (рис. 94, *е*), а частицы совершают колебания в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны (поперек волны). Поперечные волны могут возникать в твердых средах, обладающих упругой деформацией сдвига.

Скорости распространения продольных v_p и поперечных v_s волн в зависимости от упругих свойств и плотности σ среды определяются соотношениями

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\sigma(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (31)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\sigma} \frac{1}{2(1+\mu)}}. \quad (32)$$

Отношение $v_p/v_s = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}}$ показывает, что продольные волны распространяются быстрее поперечных. Для большинства горных пород $\mu = 0,2 \div 0,4$, поэтому $v_p/v_s = 1,6 \div 2,4$.

Формулы (31) и (32) показывают, что скорости упругих волн в горных породах должны уменьшаться по мере увеличения их плотности. Однако при увеличении плотности наблюдается быстрый рост величины модуля Юнга. Так, модуль Юнга интрузивных горных пород колеблется от 6 до 12 кгс/см² и увеличивается от кислых пород к основным. В осадочных скальных породах (ангидритах, известняках, низкопористых песчаниках) модуль Юнга изменяется от 4 до 7 кгс/см². В пластичных и рыхлых горных породах величина модуля Юнга имеет небольшое значение (2—3 кгс/см²). Таким образом, модуль Юнга горных пород увеличивается по мере роста их плотности, а градиент его увеличения значительно выше градиента роста плотности.

Поэтому определяющее влияние на величину скорости распространения упругих волн оказывает модуль Юнга: скорость увеличивается пропорционально \sqrt{E} .

2. Основные характеристики упругих волн

Когда в некоторой точке упругой среды происходит взрыв, то вызванная им объемная (продольная или поперечная) волна распространяется с некоторой конечной скоростью.

Колебание частиц при прохождении волны происходит в каждый момент времени внутри некоторой области среды, ограниченной двумя замкнутыми поверхностями. Внешняя поверхность Q_1 (рис. 95) отделяет в данный момент времени область упругой среды, в которой волна уже вызвала колебание частиц, от той области среды, которой возмущения еще не достигли. Эта поверхность называется *фронтом* (передним фронтом) волны. Внутренняя поверхность Q_2 отделяет область, в которой происходят колебания частиц, от той области упругой среды, в которой они уже прекратились. Эта поверхность называется *тылом* (задним фронтом) волны.

Рассмотрим, как ведет себя частица M в некоторой точке упругой среды на расстоянии r от точки взрыва O . Колебания частицы M происходят в трехмерном пространстве, поэтому их трудно изобразить графически. Ограничиваясь рассмотрением, например, вертикальной составляющей колебания, можно графически изобразить движение частицы M в виде кривой линии. Для этого будем откладывать по вертикальной оси величину отклонения u частицы M от положения равновесия (рис. 96, *а*), а по горизонтальной оси время t . Полученная кривая называется *графиком колебаний* (трассой или записью). До прихода фронта волны частица M находится в состоянии покоя. В момент времени $t_0 = r/v$ отмечается первое отклонение частицы M от положения равновесия, называемое *первым вступлением* волны. По мере прохождения волны в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 наблюдаются наибольшие отклонения a_1 , a_2 и a_3 частицы M от положения равновесия, называемые *видимыми амплитудами* колебаний. Промежуток времени, разделяющий два соседних одноименных экстремума ($T = t_3 - t_2$), называют *видимым (преобладающим) периодом* колебаний. Фронт и тыл волны с течением времени меняют свое положение в пространстве. Это означает, что область упругой среды, в которой происходят колебания, постепенно перемещается: вокруг точки возбуждения образуется расширяющаяся область, где колебание частиц прекратилось, а в колебательный процесс вовлекаются с течением времени точки среды, все более удаленные от места взрыва. Можно говорить о *видимой (преобладающей) частоте* f_v колебаний, определяемой соотношением $f = \frac{1}{T}$. Частота измеряется числом колебаний в секунду и выражается в герцах (Гц).

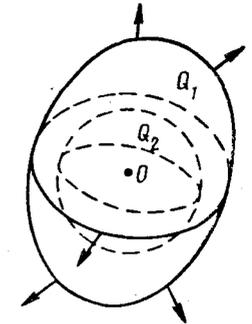


Рис. 95. Фронт волны. Фронт волны: Q_1 — передний, Q_2 — задний

Запись колебаний частиц — основной первичный материал сейсморазведки, изучение которого позволяет судить о геологическом строении исследуемого района. В сейсморазведке в основном ограничиваются получением записей колебаний для одного направления — вертикального.

Колебания, связанные с прохождением различных волн, отличаются по своему характеру, поэтому форма соответствующей им записи оказывается неодинаковой. При прохождении одной и той же волны колебания двух частиц M_1 и M_2 (рис. 96, б), расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, подобны, а соответствующие им записи (трассы) весьма близки по форме. Поэтому путем сопоставления формы колебаний в близких точках земной поверхности оказывается возможным исследовать распространение различных волн.

Прослеживание одинаковых особенностей колебаний в различных точках среды путем сопоставления формы записей называется в сейсморазведке **корреляцией**.

Для наглядного изображения волны строят кривую смещения частиц среды, расположенных вдоль некоторой прямой x (рис. 96, в) для некоторого момента времени t . По оси абсцисс откладывают

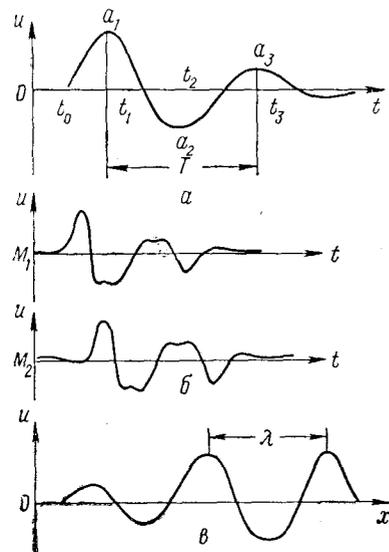


Рис. 96 Графики колебаний частиц среды и профиль волны

координаты x частиц, а по оси ординат — величину смещения частиц u относительно их положения равновесия. Полученная кривая называется **профилем** волны. Положительные экстремумы на этой кривой называются **горбам** и, а отрицательные — **впадина** м и. Расстояние λ между соседними горбами (или впадинами) называют **видимой (преобладающей) длиной** волны. Оно связано с видимым периодом и частотой соотношением

$$\lambda = vT = v/f.$$

Величина κ , обратная длине волны, называется **волновым числом**

$$\kappa = 1/\lambda = f/v.$$

Если рассматриваемая волна распространяется в однородной упругой среде, то профиль ее в некоторый более поздний момент времени $t'' > t'$ (на большем удалении от точки взрыва) будет

иметь форму, аналогичную кривой на рис. 96, в, но впадины и горбы ее будут уменьшены.

При распространении волны в неоднородной среде происходит изменение ее профиля. Оно особо заметно, когда волна распространяется в верхнем рыхлом слое почвы, что имеет большое значение для сейсморазведки.

3. Спектральное разложение графика колебаний и профиля волны

Колебания, возникающие в среде при взрыве, относятся к числу непериодических (импульсных), т. е. не повторяющихся во времени. Изучение условий их распространения и сопоставление различных импульсов между собой оказывается крайне затруднительным. Поэтому исследование непериодических колебаний стремятся свести к изучению гармонических (простейших периодических) колебаний.

Гармоническое колебание частицы M в зависимости от времени t может быть представлено уравнением

$$u = a \sin(2\pi ft + \varphi),$$

где u — величина смещения частицы M ; f — частота колебаний; φ — начальная фаза колебаний; a — амплитуда колебаний, т. е. величина наибольшего отклонения точки от ее среднего положения.

Отношение амплитуд a_1 и a_2 двух гармонических колебаний принято измерять в децибеллах (дБ). Чтобы выразить отношение амплитуд в децибеллах, следует умножить его десятичный логарифм на 20. Так, если $a_2 = 1000$, $a_1 = 10$, то отношение амплитуд a_2/a_1 составляет $20 \lg \frac{1000}{10} = 40$ дБ. При наложении двух или более гармонических колебаний возникает колебание более сложного вида, которое зависит от соотношения амплитуд, частот и начальных фаз складываемых колебаний. В общем случае, когда частица среды перемещается в пространстве, результирующее колебание есть векторная сумма отдельных колебаний.

При наложении двух колебаний одной составляющей равной частоты возникает гармоническое колебание той же частоты, а результирующие амплитуду и начальную фазу можно определить на основе векторного сложения отрезков (рис. 97, а), равных по длине амплитудам a_1 и a_2 . При этом углы наклона векторов к оси x должны быть равны соответственно начальным фазам складываемых колебаний. Длина диагонали a параллелограмма, построенного на векторах a_1 и a_2 , будет равна амплитуде результирующего колебания, а угол наклона φ диагонали к оси x равен начальной фазе результирующего колебания.

При сложении гармонических колебаний различной частоты суммарное колебание будет более сложным и представится некоторой

негармонической периодической кривой. Форму ее можно получить путем графического суммирования ординат слагающих колебаний, соответствующих одинаковым моментам времени.

Всякое сложное периодическое колебание может быть представлено суммой простых гармонических колебаний. Графически такое разложение можно изобразить в системе координат θ, f , если по оси ординат откладывать амплитуды составляющих гармонических колебаний θ , а по оси абсцисс — их частоты f . Если в определенном масштабе в виде прямолинейных отрезков нанести амплитуды составляющих колебаний против соответствующих значений частоты, то получим график (рис. 97, б), называемый спектром амплитуд заданной периодической функции.

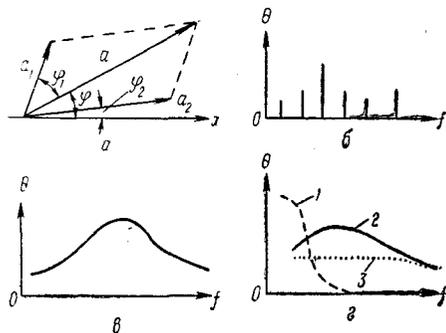


Рис. 97. Спектральное разложение графика колебаний и профиля волны.

a — определение амплитуды двух наложенных колебаний; *b* — спектр амплитуд периодической функции; *c* — спектр амплитуд непрерывной функции; *d* — соотношение спектров амплитуд колебаний, вызываемых различными волнами: 1 — поверхностная волна, 2 — отраженная волна, 3 — микросейсм

Аналогично можно построить спектр начальных фаз рассматриваемой функции.

Представление периодической функции в виде суммы гармонических колебаний называется спектральным разложением ее. Спектры амплитуд и фаз периодической функции представляются в виде совокупности конечного числа прямолинейных отрезков. Поэтому они называются линейчатыми (дискретными).

Спектральному разложению могут быть подвергнуты непериодические функции, в частности, импульсы небольшой длительности, с которыми имеют дело в сейсморазведке. Они могут быть представлены в виде суммы составляющих гармонических колебаний, отличающихся по частоте, амплитуде и фазе. Однако в спектре непериодической функции представлено бесчисленное множество простых гармонических колебаний, частоты которых образуют непрерывную последовательность. Спектры амплитуд и фаз импульсов будут иметь вид непрерывных кривых (рис. 97, в), выражающих зависимость амплитуды и начальной фазы слагающего гармонического колебания от его частоты. Такие спектры называются непрерывными (сплошными).

Если импульс обладает определенной видимой частотой колебаний, то спектр амплитуд имеет максимум вблизи этого значения частоты. Это означает, что среди слагающих данный импульс

гармонических колебаний преобладают колебания с частотами, близкими к видимой. Это обстоятельство позволяет в практике сейсморазведки иногда ограничиваться определением видимой частоты импульсов, определяющей положение максимума спектра амплитуд. Ширина спектра амплитуд зависит от длительности импульса; при увеличении длительности импульса ширина спектра сокращается.

Различия в спектрах амплитуд (частотном составе) колебаний, создаваемых волнами различного типа, широко используются в сейсморазведке для повышения качества полевых материалов. Поперечные и поверхностные волны обычно содержат меньше высоких частот (рис. 97, д), чем продольные волны, наблюдаемые в том же месте. Колебания почвы, вызванные ветром, дождем, работой транспорта и т. п. (микросейсм), проявляются в широкой области частот. Используя различия в частотном составе, с помощью специальной аппаратуры можно выделять волны, представляющие наибольший интерес для разведки.

Профиль импульсной волны можно представить в виде суммы гармонических волн, различающихся между собой длиной. Зависимость амплитуд и фаз гармонических волн, составляющих в сумме импульсную волну, от их волнового числа k называют пространственными спектрами амплитуд и фаз импульсной волны.

§ 59. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В УПРУГОЙ СРЕДЕ

По мере распространения волны фронт ее в последовательные моменты времени занимает различное вполне определенное положение в среде. Для определения положения фронта волны в различные моменты времени вводят понятие об изохронах, т. е. поверхностях равного времени. Совокупность изохрон, принадлежащих данной волне, называют семейством изохрон. Область среды, в каждой точке которой определено время прихода волны, называется полем времени.

Линия, которая в каждой точке составляет прямой угол с изохронами, называется лучом. Лучи представляют собой линии, вдоль которых происходит распространение волны. В однородной среде лучи являются отрезками прямых линий. В случае точечного источника, расположенного в однородной среде, изохроны имеют вид сферических поверхностей с источником O (рис. 98) в центре, а лучи — отрезков прямых линий, расходящихся от центра источника во всех направлениях. График, на котором совмещены изохроны и лучи, исходящие из точечного источника, называют лучевой диаграммой. Лучевые диаграммы находят применение при интерпретации сейсмических данных.

Сейсмические наблюдения часто проводят на дневной поверхности, которую можно принять за плоскость xOy (рис. 99, а).

В различных точках поверхности определяют время прихода волны и составляют график, выражающий зависимость времени прихода волны t от координат точек наблюдения x и y . Такой график называется г о д о г р а ф о м данной волны.

Годограф, составленный по наблюдениям в точках, расположенных на некоторой поверхности, называется п о в е р х н о с т н ы м (рис. 99, а). Годограф, составленный по наблюдениям, проведенным вдоль некоторых линий, обычно прямых, называется л и н е й н ы м. Линейный годограф называют п р о д о л ь н ы м, если источник колебаний расположен на линии наблюдений (рис. 99, в). При расположении источника в стороне от линии наблюдений (рис. 99, б) годограф называют непродольным (поперечным).

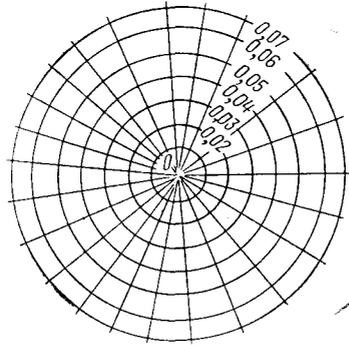


Рис. 98. Изохроны в секундах сферической волны в однородной среде при точечном источнике

пробега от точки O до произвольной точки C (рис. 99, а) определяется выражением

$$t = \frac{OC}{v} = \frac{1}{v} \sqrt{x^2 + y^2},$$

которое представляет собой уравнение поверхностного годографа прямой волны. Графически годограф изображается конусом с вершиной в точке O . Если прямую волну наблюдать вдоль некоторой линии x , то уравнение линейного годографа прямой волны будет иметь вид

$$t = \mp x/v,$$

а годограф — состоять из двух отрезков прямых линий, проходящих через начало координат O .

Если волна распространяется вдоль оси x , то зная времена t_1 и t_2 прихода волны в двух точках x_1 и x_2 оси, можно определить скорость распространения волны (рис. 99, з). Поскольку $t_1 = x_1/v$ и $t_2 = x_2/v$, следовательно $t_2 - t_1 = 1/v(x_2 - x_1)$, значит $v = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1) = \Delta x/\Delta t$, где Δx — расстояние между двумя точками приема волны; Δt — промежуток времени, за который волна прошла путь Δx .

Если фронт волны образует с осью наблюдения некоторый угол α , то вычисленная скорость не будет истинной. В некоторый момент времени t_1 фронт регистрируемой волны пришел в точку x_1 . В следующий момент времени t_2 фронт волны пришел в точку x_2 . За промежуток $\Delta t = t_2 - t_1$ времени фронт прошел путь Δs , поэтому $v = \Delta s/\Delta t$. По линии x след фронта за время Δt проходит отрезок $\Delta x = x_2 - x_1$. Поэтому скорость следа фронта по направлению x $v_k = \Delta x/\Delta t = \Delta s/(\Delta t \sin \alpha)$ или $v_k = v/\sin \alpha$.

Величина v_k получила название кажущейся скорости, а угол α называют углом падения волны. Кажущаяся скорость, как видно, равна угловому коэффициенту годографа волны. Она может быть положительной и отрицательной, а по модулю — изменяться от истинной до бесконечности. Когда фронт волны параллелен линии наблюдений ($\alpha = 0$), то $v_k = \infty$. При $\alpha = 90^\circ$ фронт волны перпендикулярен к линии наблюдения и $v_k = v$.

1. Основные принципы геометрической сейсмологии

Законы распространения упругих волн (фронтов и лучей) в упругой среде могут быть получены на основе принципов геометрической оптики Гюйгенса — Френеля или Ферма, а также принципов суперпозиции и взаимности. Согласно принципу Гюйгенса, каждую точку изохроны времени t_i можно рассматривать как самостоятельный элементарный источник колебаний. Это дает возможность, имея заданную изохрону и зная скорость распространения волны, построить любую новую изохрону для любого момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$.

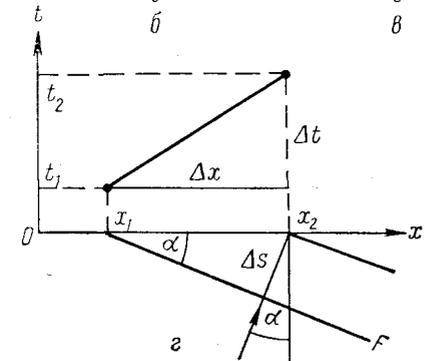
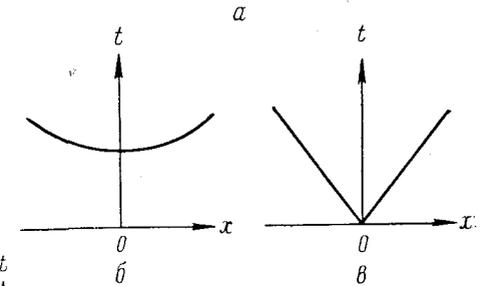
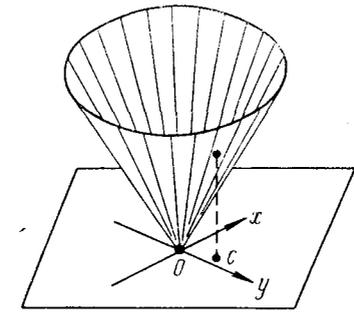


Рис. 99. Годографы прямой волны. а — поверхностный; б, в — линейные; з — схема связи между годографом и кажущейся скоростью

С этой целью на поверхности изохроны задают семейство точек A_i , из каждой точки проводят дугу с радиусом $\Delta r = v\Delta t$ (рис. 100). Далее через полученные окружности проводят огибающую поверхность, которая является изохроной для момента времени $t_2 = t_1 + \Delta t$.

В соответствии с принципом Ферма, время пробега волны из одной точки в другую вдоль луча меньше ее пробега вдоль другого возможного пути. Принцип Ферма позволяет определить форму сейсмического луча в среде, где известен характер распределения скоростей.

Если в среде распространяются одновременно две или несколько волн, то, согласно принципу суперпозиции, каждая из них

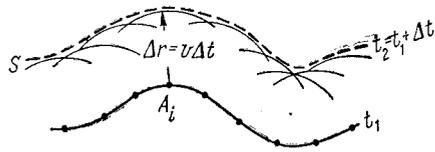


Рис. 100. Определение изохроны по принципу Гюйгенса

движется так, как будто другой волны не существует. Этот принцип дает возможность получить картину распространения волн от сложного источника путем замены его суммой элементарных источников.

Согласно принципу взаимности, при перемене мест источника и приемника колебаний картина в приемнике будет такая же, что и в первоначальных положениях приемника и источника.

В неоднородной среде, характеризуемой непостоянством скорости распространения упругой волны, лучи ее непрямолинейны. Рассмотрим особенности распространения волны в пространстве, имеющем границу R (рис. 101). Выше границы R находится среда I , где скорости распространения продольных и поперечных волн равны v_{P1} и v_{S1} , а ниже границы — среда II , где скорости равны v_{P2} и v_{S2} . В среде I распространяется упругая волна (продольная или поперечная), которую назовем падающей. Когда падающая волна достигает границы R , происходит ее отражение и преломление. За счет энергии падающей волны образуются вторичные волны: отраженные (продольная P_{11} и поперечная P_1S_1) и проходящие (продольная P_{12} и поперечная P_1S_2). Отраженные волны распространяются в среде I , а проходящие — в среде II . Следовательно, на границе R каждая падающая волна возбуждает четыре вторичных волны. Вторичные волны, имеющие тот же тип (продольная или поперечная), что и падающая, называются монотипными. Вторичные волны, иного типа по отношению к падающей, называются обменными. При отражении и преломлении волны происходит излом лучей и изменение направления фронта.

2. Отражение и преломление волн

Рассмотрим закон отражения упругих волн. Допустим, что в точке O (рис. 102) земной поверхности на линии Ox расположен источник, из которого на границу R под углом α_1 в точку A падает продольная волна со скоростью v_1 . В точке A возникает отраженная волна, которая со скоростью v_2 движется к точке B . Угол α_2 , образованный лучом AB и нормалью AA' к границе R , называется углом отражения. В случае монотипной отраженной

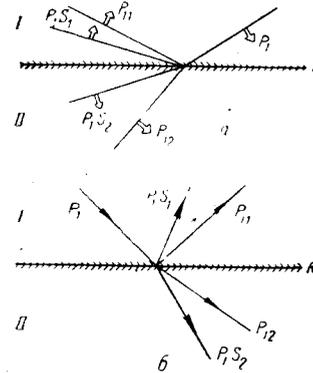


Рис. 101. Образование вторичных волн.

a — положение изохрон; b — положение лучей

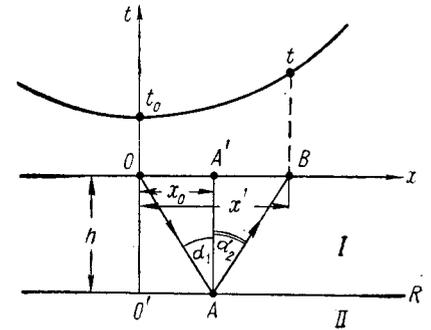


Рис. 102. Отражение волны и ее годограф

волны $v_2 = v_1$, в случае обменной отраженной волны $v_2 \neq v_1$. Время t прохождения волны по лучу OAB

$$t = \frac{OA}{v_1} + \frac{AB}{v_2} = \frac{x_0}{v_1 \sin \alpha_1} + \frac{x' - x_0}{v_2 \sin \alpha_2} = \frac{\sqrt{x_0^2 + h^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(x' - x_0)^2 + h^2}}{v_2}.$$

По принципу Ферма точка A должна быть расположена таким образом, чтобы время t пробега волны вдоль луча OAB было наименьшим. Это условие будет выполнено в такой точке оси x , где производная $dt/dx_0 = 0$, следовательно

$$\frac{dt}{dx_0} = \frac{x_0}{v_1 \sqrt{x_0^2 + h^2}} - \frac{x' - x_0}{v_2 \sqrt{(x' - x_0)^2 + h^2}} = 0.$$

Согласно рис. 102,

$$\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + h^2}} = \sin \alpha_1; \quad \frac{x' - x_0}{\sqrt{(x' - x_0)^2 + h^2}} = \sin \alpha_2.$$

Тогда $dt/dx_0 = \sin \alpha_1/v_1 - \sin \alpha_2/v_2 = 0$, или $\sin \alpha_1/v_1 = \sin \alpha_2/v_2$. Это соотношение выражает закон отражения

(закон Снеллиуса) в общей форме. Так как $v_2 = v_1$, то $\alpha_1 = \alpha$. Таким образом, угол отражения равен углу падения.

Амплитуда отраженной волны зависит от угла падения α_1 и соотношения скоростей и плотностей в средах, разделенных границей R . Введем следующие обозначения: a_p — амплитуда падающей продольной волны P_1 ; a_{pp} — амплитуда отраженной продольной волны P_{11} ; a_{ps} — амплитуда отраженной поперечной волны P_1S_1 .

Величины

$$A_{pp} = \frac{a_{pp}}{a_p}, \quad A_{ps} = \frac{a_{ps}}{a_p} \quad (33)$$

называют коэффициентами отражения.

При нормальном падении продольной волны ($\alpha_1 = 0$) на границу R коэффициенты отражения

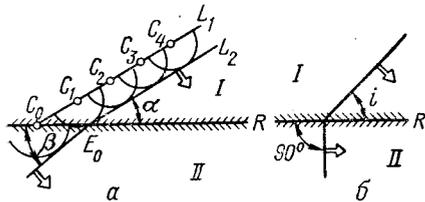


Рис. 103. Преломление волны

$$A_{pp} = \frac{\sigma_2 v_{p2} - \sigma_1 v_{p1}}{\sigma_2 v_{p2} + \sigma_1 v_{p1}},$$

$$A_{ps} = 0,$$

где σ_1 и σ_2 — плотности сред I и II .

Произведение $\gamma = \sigma v$ называется акустической

жидкостью или волновым сопротивлением среды. Из соотношений (33) видно, что отраженная волна возникает на границах сред с различным волновым сопротивлением, т. е. при условии

$$\sigma_1 v_{p1} \neq \sigma_2 v_{p2}.$$

Такие границы называются отражающими. При нормальном падении волны обменные отраженные волны не возникают. При небольших углах отражения формы колебаний падающей и отраженной волн близки между собой, но при $\gamma_1 > \gamma_2$ направление смещения частиц среды изменяется на противоположное. Однако при условии $v_{p1} < v_{p2}$ и при больших углах падения формы колебаний падающей и отраженной волн могут иметь существенные различия.

Теперь рассмотрим закон преломления волн. Допустим, что на границу R падает фронт плоской волны с углом падения α (рис. 103). Скорость волны в среде I равна v_1 , а в среде II — v_2 . В момент времени t_1 фронт падающей волны достиг границы R в точке C_0 . Согласно принципу Гюйгенса, отдельные точки C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 изохроны L_1 можно рассматривать как элементарные источники колебаний и найти положение фронта волны в момент времени $t_2 = t_1 + \Delta t$. С этой целью необходимо из точек $C_1 - C_4$ провести полусферы радиусом $\Delta r_1 = v_1 \Delta t$, а из точки C_0 — полусферу радиусом $\Delta r_2 = v_2 \Delta t$ (поскольку элементарная волна,

исходящая из точки C_0 , распространяется в среде II со скоростью v_2). Огибающая ко всем полусферам будет изображать положение фронта L_2 в момент времени t_2 . На рис. 102, а видно, что на границе R фронт преломлен. В среде II угол β , составленный фронтом волны с границей R , называется углом преломления.

Согласно рис. 103, а,

$$C_0 E_0 = \frac{\Delta r_1}{\sin \alpha} = \frac{\Delta r_2}{\sin \beta}.$$

Подставив в эту формулу значения Δr_1 и Δr_2 , получим так называемый закон преломления (закон Снеллиуса):

$$\frac{\sin \alpha}{v_1} = \frac{\sin \beta}{v_2}. \quad (34)$$

Граница, на которой происходит излом фронтов (или лучей), называется скоростной границей. Связь между амплитудами b_{pp} монотипной проходящей волны P_{12} , b_{ps} обменной проходящей волны P_1S_2 и a_p продольной падающей волны P_1 определяется коэффициентами прохождения (коэффициентами прозрачности):

$$B_{pp} = \frac{b_{pp}}{a_p}, \quad B_{ps} = \frac{b_{ps}}{a_p}.$$

Они сложным образом зависят от угла падения α и от свойств соприкасающихся сред. В случае нормального падения ($\alpha = 0$) справедливы соотношения

$$B_{pp} = \frac{2\sigma_1 v_{p1}}{\sigma_2 v_{p2} + \sigma_1 v_{p1}}, \quad B_{ps} = 0. \quad (35)$$

Соотношения показывают, что при нормальном падении не возникают обменные проходящие волны.

Анализ формулы (34) показывает, что если $v_1 > v_2$, то $\sin \beta < \sin \alpha$, т. е. угол преломления меньше угла падения. В случае $v_2 > v_1$ угол преломления будет больше угла падения. Для сейсморазведки особый интерес представляет явление полного внутреннего отражения, когда $\beta = 90^\circ$ (рис. 103, б) и луч проходящей волны скользит в среде II вдоль границы раздела.

Угол падения $\alpha = i$, при котором угол преломления равен 90° , называется критическим углом или углом полного внутреннего отражения. Поскольку в формуле (34) $\sin \beta = 1$, то

$$\sin i = v_1/v_2.$$

Когда угол α близок к критическому или превосходит его, наблюдается резкое изменение коэффициентов отражения и

прохождения, а форма колебаний в отраженной и проходящей волнах резко отличается от формы колебаний, связанных с падающей волной.

Когда проходящая волна скользит вдоль границы R , то вызывает колебания частиц в среде I , поэтому в ней возникает г о л о в н а я или п р е л о м л е н н а я волна. Граница, на которой возникает преломленная волна, называется п р е л о м л я ю щ е й г р а н и ц е й.

3. Дифрагированные поверхностные, звуковые и другие волны, применяемые в сейсморазведке

Рассмотрим случай, когда упругая волна встречает на своем пути препятствие. Явление огибания волной препятствия называется д и ф р а к ц и е й.

Если на пути волны встречается препятствие, то наблюдается некоторое возмущение, огибающее препятствие, называемое д и ф р а г и р о в а н н о й волной. По принципу Гюйгенса можно построить изохроны дифрагированной волны. При этом следует рассматривать каждую точку препятствия

Рис. 104. Дифрагированные (а) и поверхностные (б) волны

в качестве элементарного источника, излучающего в момент, когда его достигает падающая волна. Если в среде имеется включение в виде сферы (рис. 104, а) с радиусом, во много раз меньшим длины волны, то его можно рассматривать как точечный источник колебаний, волны от которого распространяются по законам, описанным выше. Изохроны точечного источника в однородной среде будут иметь форму сферических поверхностей. Падающие, отраженные и преломленные волны носят название о б ъ е м н ы х волн, потому что передаваемые ими деформации охватывают весь окружающий объем среды. В отличие от них, на границах, разделяющих среды с различными упругими свойствами, распространяются п о в е р х н о с т н ы е волны. К ним относятся волны, распространяемые вдоль поверхности почвы, буровых скважин, горных выработок, морского дна и т. д. Наибольшее значение для сейсморазведки имеют наблюдаемые на поверхности земли поверхностные волны Релея и Лява (рис. 104, б). В поверхностной волне Релея колебания частиц поверхности почвы происходят по эллиптическим вытянутым по вертикали орбитам, параллельным лучу распространения волны. Волны Релея сходны с волнами, возникающими на поверхности воды, где частицы движутся по круговым орбитам. Волны Релея

распространяются со скоростью, меньшей скорости распространения поперечных объемных волн ($v_R = 0,9 v_S$). Видимый период поверхностных волн Релея обычно больше, чем у объемных. На глубине, равной $1,5 \div 2$ видимым длинам поверхностной волны, амплитуда поверхностных волн в 10—20 раз меньше и далее очень быстро убывает.

Волны Лява представляют собой поперечные поверхностные волны. Она вызывает колебания частиц в горизонтальной плоскости, в направлении, перпендикулярном к направлению распространения волн. Волны Лява возникают в случае, когда на поверхность выходит тонкий слой со скоростью v_{S1} , залегающей на пласте со скоростью $v_{S2} > v_{S1}$. Скорость распространения волны Лява v_2 находится в пределах между величинами v_{S2} и v_{S1} . С удалением в нижний пласт амплитуда колебаний быстро убывает.

При взрывах в воздухе, шурфах и мелких скважинах возникают и распространяются со скоростью около 340 м/с. сильные продольные звуковые волны. Под их воздействием на поверхности почвы возникают интенсивные поверхностные волны. В сейсморазведке практический интерес представляют главным образом продольные отраженные волны, а также продольные преломленные волны, возникающие при угле преломления, равном 90° .

Все другие рассмотренные выше виды волн рассматриваются как помехи. К помехам относятся также многократно отраженные, отраженно-преломленные и преломленно-отраженные волны, отразившиеся или преломившиеся более одного раза на различных отражающих или преломляющих границах.

В сейсморазведке рассматривают понятия н е р е г у л я р н ы х и р е г у л я р н ы х волн. Нерегулярные волны образуются при наличии в разрезе большого числа сейсмических границ. Они обладают примерно равной интенсивностью, приходят одновременно к поверхности земли и интерферируют между собой. Форма и амплитуда колебаний для таких волн резко и закономерно изменчивы в близких точках земной поверхности, что делает невозможным их корреляцию. Лишь при небольшом числе наложенных волн с помощью аппаратных и методических средств удается разделить нерегулярную волну на составляющие ее простые волны. К регулярным волнам относят такие, которые могут быть прослежены на достаточно протяженном отрезке наблюдений.

П о л е з н ы м и в сейсморазведке называются волны, которые могут быть использованы для изучения геологического строения данного района или участка. Амплитуды полезных волн, изучаемых на дневной поверхности, зависят от условий возбуждения колебаний (см. §62) и условий распространения волн в среде. Амплитуды их уменьшаются по мере увеличения длины пути,

который проходят волны от источника до точки наблюдений, в процессе рассеивания и поглощения энергии волн при трении между частицами среды, в мелких неоднородностях. Падающая волна на границах неоднородностей расходует часть энергии на образование отраженных и преломленных волн, поэтому энергия проходящей волны уменьшается. Интенсивность отраженных и преломленных волн убывает по мере увеличения глубины до границ, где они образовались. Это особенно четко проявляется в методе отраженных волн, где амплитуды волн, отраженных от глубоких горизонтов, часто в тысячи раз меньше амплитуд прямой волны или волн, пришедших от неглубоко залегающих границ.

Большое влияние на интенсивность полезных волн оказывает характер границ. Чем меньше различие волнового сопротивления на границе, тем меньше будет амплитуда отраженных и преломленных волн. В случае, когда сейсмическая граница разделяет среды с резко различающимися скоростями или волновыми сопротивлениями, на ней возникают отраженные или преломленные волны с большой амплитудой.

В среднем амплитуда колебаний убывает с увеличением времени пробега. Отношение амплитуд наиболее и наименее интенсивных полезных волн, подлежащих изучению и измеренных в одной и той же точке поверхности земли, называют естественным динамическим диапазоном регистрируемых колебаний. Эта величина для отраженных волн при наблюдении вблизи источника и времени пробега до 3 с достигает 80 дБ и выше.

Волны, отчетливо наблюдаемые на больших площадях исследуемого района, называют опорными (маркирующими), а границы, на которых они возникают, — опорными (маркирующими) горизонтами.

4. Годографы отраженных и преломленных волн

В случае горизонтальной отражающей границы уравнение годографа имеет вид

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{4h^2 + x^2}. \quad (36)$$

Годограф представляет собой гиперболу, ось симметрии которой совпадает с осью времен t (см. рис. 102). При $x = 0$, когда падающая и отраженная волны проходят в сумме минимальный путь $OO'O$, время пробега t_0 будет минимальным: $t_0 = 2h/v_1$. Величина t_0 получила название вертикального времени.

Уравнение годографа отраженной волны от наклонной плоской сейсмической границы имеет вид (рис. 105):

$$t = \frac{1}{v_1} \sqrt{4h^2 + x^2 + 4hx \sin \varphi},$$

где φ — угол наклона отражающей границы.

Минимум годографа t_{\min} смещается от источника колебаний в сторону восстания отражающей границы. Его абсцисса совпадает с проекцией на ось Ox точки O^* зеркального отражения источника O . Для нахождения точки O^* необходимо отрезок OO' продолжить через границу R и на его продолжении отложить отрезок $O'O^* = OO'$.

При наличии двух горизонтальных отражающих границ R_1 и R_2 , залегающих на глубинах h_0 и h уравнение годографа отраженной волны от границы R_2 на отрезке, прилегающем к источнику упругих колебаний, может быть приближенно представлено в виде

$$t = \frac{1}{v_{\text{эф}}} \sqrt{4h_{\text{эф}}^2 + x^2},$$

где $v_{\text{эф}}$ — эффективная скорость, зависящая от угла падения волны на границу R_2 . Поскольку отраженная волна от границы R_2 приходит позднее, то годограф ее располагается выше годографа отраженной волны от границы R_1 . Найдем уравнение годографа преломленной волны для простейшего случая. В некоторый момент времени t_1 продольная волна падает на границу R в точке C под критическим углом $\alpha = i$ (рис. 106). Проходящая волна движется вдоль границы R со скоростью v_r , которую называют граничной скоростью. Она характеризует скорость распространения упругих волн в верхней части слоя II. Скользя вдоль границы R , проходящая волна вызывает в вышележащем слое головную (или преломленную) волну.

Преломленная волна возникает впервые в точке C , из которой под углом i она движется к поверхности земли и наблюдается в точке D профиля и правее нее. Фронт преломленной волны имеет плоскую поверхность, перпендикулярную к лучу CD .

Влево от луча CD преломленной волны не существует, поскольку левее точки C угол падающей волны меньше критического. Вдоль луча CD распространяется также отраженная волна, фронт которой имеет форму сферической поверхности. Таким образом, фронт преломленной волны касается фронта отраженной волны в точках, расположенных вдоль луча CD . Поскольку

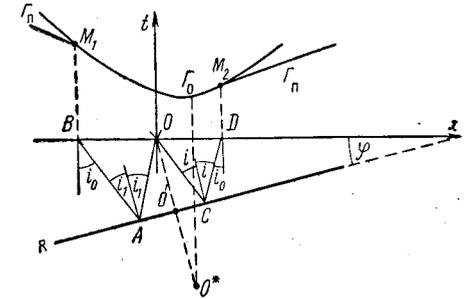


Рис. 105. Годографы отраженной и преломленной волн для наклонной сейсмической границы

1. Принцип работы аппаратуры

Сейсморазведочная аппаратура предназначена для регистрации (записи) механических колебаний среды в пунктах, расположенных на поверхности земли, в скважинах или горных выработках. Основным способом регистрации колебаний является в о с п р о и з в о д и м а я (п р о м е ж у т о ч н а я) з а п и с ь на магнитную пленку. Реже применяется н е в о с п р о и з в о д и м а я (п р я м а я) з а п и с ь на фоточувствительную бумагу.

Основными узлами аппаратуры с промежуточной магнитной записью являются канал записи (сейсмический канал) и канал воспроизведения. В аппаратуре с прямой записью имеется лишь сейсмический канал.

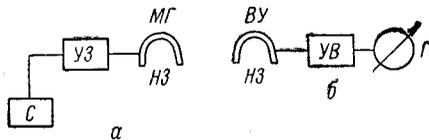


Рис. 107. Блок-схема сейсмического канала.
а — канал записи при промежуточной регистрации; б — канал воспроизведения

Сейсмический канал включает совокупность трех последовательно соединенных устройств: сейсмоприемник — усилитель — регистрирующее устройство.

Сейсмоприемник представляет собой электромеханическое устройство, в котором энергия колебаний почвы преобразуется в электрическую. Сейсмоприемники устанавливаются на поверхности вдоль линии наблюдений. Остальные устройства канала записи размещены в сейсмической станции (рис. 107, а).

Электрическая энергия в виде сигналов изменяющегося электрического напряжения, передается по кабелю в сейсмическую станцию. Поскольку амплитуда этих сигналов очень мала (от микровольт до сотен милливольт), они могут быть зарегистрированы лишь после предварительного усиления. С этой целью в сейсмическом канале имеется усилитель записи УЗ. Одновременно с усилением слабых электрических колебаний в усилителе записи на основе различия частотного спектра полезных волн и помех происходит относительное ослабление (фильтрация) мешающих колебаний.

Усиленные сигналы поступают в регистрирующее устройство, где изменения напряжения записывают на носителе записи (НЗ). Таким носителем может быть магнитная пленка, светочувствительная или обычная бумага и т. п. Регистрирующими устройствами могут быть магнитные головки МГ при записи на магнитную пленку, гальванометры Г или лампы при записи на светочувствительный материал, перописец при записи на обычную бумагу.

Сейсмические станции позволяют регистрировать сигналы от сейсмоприемников, установленных в нескольких точках. С этой целью в станциях имеется несколько каналов, и они называются многоканальными.

Усилители, входящие в состав сейсмической станции, устанавливаются в один или несколько блоков.

В регистрирующем аппарате (регистраторе) регистрирующие устройства расположены в ряд, благодаря чему имеется возможность на один носитель записать колебания, воспринятые во многих точках линии наблюдения. На носителе записи регистрируются также импульсы, отмечающий момент взрыва (отметка момента ОМ), а также марки времени МВ, позволяющие отсчитывать разность времени между любыми точками записи. Марки времени записывают в форме синусоидальных колебаний или в виде поперечных полос частотой 100 Гц. Полученная лента, на которой записаны колебания от нескольких сейсмоприемников, марки времени и отметка момента взрыва, называется полевой сейсмограммой. В зависимости от способа регистрации различают магнитную сейсмограмму (магнитограмму) фотografическую сейсмограмму и т. д.

При получении магнитограмм применяют аналоговую и цифровую записи колебаний на магнитную пленку.

Аналоговая запись заключается в плавном изменении намагниченности магнитной пленки пропорционально амплитуде поступающих электрических сигналов. Аналоговая запись может быть непосредственная и модулированная. При непосредственной записи сравнительно низкочастотные сейсмические колебания из усилителя записи непосредственно подаются в обмотку магнитной головки и регистрируются на пленке. При модулированной записи сейсмические колебания используются для модуляции высокочастотных колебаний или очень коротких импульсов, вырабатываемых специальным генератором, подобно тому, как это делается в радиопередающих или телевизионных устройствах. На магнитной ленте регистрируются модулированные колебания. Модулированная запись улучшает качество воспроизводимых впоследствии сейсмограмм.

При цифровой записи непрерывное сейсмическое колебание расчленяется на последовательность дискретных значений измеряемой величины. Эти значения определяются через малые промежутки времени и записываются на носителе в виде последовательности чисел.

Запись, нанесенная на магнитную ленту в конечном счете должна быть визуализирована, т. е. преобразована в видимую форму, иначе она недоступна для восприятия. Для визуализации промежуточной магнитной записи служит канал воспроизведения. Он имеется почти в каждой сейсмической станции для контроля качества регистрации колебаний в полевых условиях.

Основными узлами канала воспроизведения являются (рис. 107, б) воспроизводящее (считывающее) устройство ВУ, усилитель воспроизведения УВ и регистрирующий прибор Г, например, гальванометр, перописец и т. д.

В качестве воспроизводящего устройства в станциях с промежуточной магнитной записью применяют магнитную головку, в которой возникают электрические сигналы, когда мимо нее перемещается носитель записи. Слабые токи, возникающие в магнитной головке, поступают в УВ. В станциях с цифровой записью между магнитными головками и усилителем записи имеется электронная схема преобразования цифровой записи в аналоговую.

В усилителе воспроизведения происходит усиление, фильтрация и другие преобразования сигналов. При воспроизведении модулированной записи в усилителе осуществляется демодуляция сигналов, т. е. выделение низкочастотных сейсмических сигналов. С выхода усилителя сигналы записываются регистрирующим прибором в видимой форме. Магнитная запись может быть визуализирована многократно при различных значениях параметров усилителя воспроизведения. Это позволяет извлекать из сейсмической записи большой объем полезной информации, ускорять и упрощать процесс полевых работ. Поэтому воспроизводимая регистрация является основным способом записи в современных сейсмических станциях. Прямую регистрацию применяют лишь при выполнении наиболее простых видов сейсморазведочных исследований.

Каналы воспроизведения сейсмостанций применяют в основном для контроля качества полевых материалов. Для обработки полевых сейсмограмм применяют специальные сейсмические установки стационарного типа, устанавливаемые в камеральном бюро. Стационарные установки имеют каналы воспроизведения, и позволяют выполнять преобразование полевых записей и их визуализацию. В установках имеется возможность многократной перезаписи с одной магнитной пленки на другую, что расширяет круг операций обработки сейсмических записей.

Различают одновременный (параллельный) и разновременный (последовательный) способы воспроизведения. В параллельном способе воспроизводящее устройство содержит столько воспроизводящих каналов, сколько трасс записано на магнитограмме. В результате этого за одно прохождение магнитограммы мимо магнитных головок получается полная сейсмограмма. В последовательном способе воспроизводящее устройство содержит один канал. Магнитограмма, укрепленная на вращающемся барабане, многократно проходит мимо головок, и при каждом обороте барабана воспроизводится одна трасса (или сумма колебаний на нескольких трассах, для чего к входу усилителя воспроизведения присоединяют одновременно несколько головок). Многоканальная сейсмограмма

получается после того, как барабан сделает число оборотов, равное числу трасс.

Всякий носитель может быть использован для записи колебаний определенного диапазона амплитуд. Его нижняя граница определяется шумами, которые возникают в считывающем устройстве, связанными с неоднородностью магнитного слоя. Верхняя граница обусловлена перегрузкой носителя (например, магнитный слой намагничивается до насыщения), что приводит к нелинейным искажениям.

Если обозначить через a_1 амплитуду наибольшего сигнала, который может быть записан без недопустимых нелинейных искажений, а через a_2 — амплитуду самого слабого сигнала, который может быть записан и превышает в 1,5—2 раза уровень внутренних шумов, то отношение

$$\alpha = a_1/a_2$$

определяет динамический диапазон носителя. Современные носители имеют динамический диапазон 40—50 дБ. Поскольку естественный динамический диапазон часто значительно больше, то при аналоговом способе записи вносятся амплитудные искажения.

Для их уменьшения и сглаживания применяют особые устройства — регуляторы усиления (РУ), которые изменяют коэффициент усиления записи во времени.

Все аппараты, входящие в сейсмический канал, являются линейными, так как в них выполняется принцип суперпозиции колебаний: если на вход аппарата действует одновременно два различных сигнала, то каждый из них передается через аппарат независимо от другого, как если бы другой сигнал отсутствовал. Когда через линейный аппарат проходит сложный сигнал, то форма сигнала на выходе не тождественна форме его на входе: происходит изменение амплитуды и сдвиг фаз в зависимости от частоты передаваемых сигналов. Зависимость отношения амплитуд гармонических колебаний на выходе $a_{\text{вых}}$ и входе $a_{\text{вх}}$ от частоты f :

$$\frac{a_{\text{вых}}}{a_{\text{вх}}} = F(f)$$

называют частотной характеристикой аппарата.

Амплитудные спектры сигналов на выходе аппарата зависят не только от вида этих спектров на входе, но и от особенностей аппарата. Если частотная характеристика аппарата имеет четко выраженный максимум при частоте f_0 (рис. 108); то колебания именно



Рис. 108. Частотная характеристика линейного регистрирующего аппарата

близкой к ней частоты с наибольшим усилением пройдут через аппарат и будут подчеркнуты в спектре сигнала на его выходе. Область частот от f_1 до f_2 , где $F(f_1) = F(f_2) = 0,7 F(f_0)$, называется *полосой пропускания аппарата*.

Если регистрирующий канал состоит из нескольких последовательно соединенных приборов, что имеет место в сейсморазведке, то частотная характеристика всего канала представляет собой произведение частотных характеристик каждого прибора (сейсмоприемника, усилителя, регистрирующего устройства). Это означает, что частотную характеристику всего канала можно преобразовать путем изменения характеристики в одном из его звеньев, например в усилителе. Частотную характеристику канала подбирают таким образом, чтобы полоса пропускания его приходилась на такую область спектра амплитуд, где отношение амплитуд полезного сигнала и помехи наибольшее (см. рис. 97, з). Искажения, вносимые линейными системами, называются *линейными искажениями*.

Сейсморазведочными станциями, чтобы облегчить прослеживание волн на одной сейсмограмме, регистрируют колебания в 24 или 48 точках земной поверхности, используя для этой цели 24 или 48 однотипных сейсмических каналов. Чтобы иметь возможность проследить волну на сейсмограмме, все каналы должны вносить в первоначальный сигнал одинаковые искажения, т. е. быть *идентичными*.

Регуляторы усиления, применяемые для изменения коэффициента усиления сигналов во времени, вносят в запись нелинейные искажения, вследствие чего теряется часть информации, которая содержалась в исходных сейсмических колебаниях. Это является одним из важных недостатков аналогового способа записи. Цифровая регистрация лишена такого недостатка, потому что воспринятые сейсмоприемником сигналы записываются на пленку в виде последовательности чисел, указывающих последовательные мгновенные значения сигнала.

2. Сейсмоприемники

Преобразование механической энергии упругих колебаний окружающей среды в электрические сигналы осуществляется сейсмоприемниками. При наземных работах применяются сейсмоприемники с индукционными преобразователями. При сейсмических исследованиях на море применяются пьезоэлектрические приемники. Схема устройства индукционного сейсмоприемника изображена на рис. 109, а.

Внутри корпуса 1, установленного на колеблющемся основании 2, укреплен цилиндрический магнит с наконечниками 3. Внутри цилиндра расположен непроводящий стержень 4, на концах которого установлены катушки с проводом 5. Стержень крепится к корпусу с помощью пластинчатых пружин 6. При рез-

ком движении основания 2 вместе с ним перемещается корпус прибора с магнитом 3. Стержень с катушками, скрепленный с корпусом пластинчатыми пружинами 6, по инерции остается на месте, в результате чего зазоры 7 между катушками и полюсными наконечниками резко меняются. В витках катушек 5 вследствие пересечения ими силовых линий магнита наводится э. д. с. индукции, благодаря чему на выходе прибора между точками а и б возникает импульс электрического напряжения.

Таким образом, при возбуждении колебаний подставки инертная масса стремится сохранить состояние покоя. Описанный тип сейсмоприемника, у которого роль инертной массы выполняют катушки, помещенные в магнитное поле магнита, получил название *электродинамического Сейсмоприемника*, у которых роль инертной массы выполняют магниты, а с корпусом жестко скреплены сердечники катушек, называются *электромагнитными*.

В сейсморазведке широкое применение имеют легкие (массой 100—120 г) индукционные электродинамические сейсмоприемники «Светлячок» СМВ и СМГ, предназначенные для приема вертикальных (СМВ) и горизонтальных (СМГ) колебаний почвы, а также сейсмоприемник НС-3 (массой 1,2 кг) для приема как вертикальных, так и горизонтальных колебаний почвы. Для проведения сейсмических исследований в скважинах применяется легкий (массой 370 г) универсальный электродинамический приемник УНЭС. Его устанавливают в герметических скважинных снарядах. Инертная масса приемника соединена с корпусом прибора, что позволяет при изменении угла наклона корпуса по отношению к вертикали регистрировать как продольные, так и поперечные волны.

Пьезоэлектрический сейсмоприемник представляет собой керамическую трубку из титаната бария, толщина ее стенки — около 1 мм, внутренняя и внешняя поверхности покрыты металлом. К ним припаяны проводники. Изменения давления, возникающие в воде при распространении упругой волны, приложенные к сейсмоприемнику, преобразуются в электрические колебания.

Магнитострикционные сейсмоприемники состоят из ферромагнитного сердечника с обмоткой. Под воздействием упругих

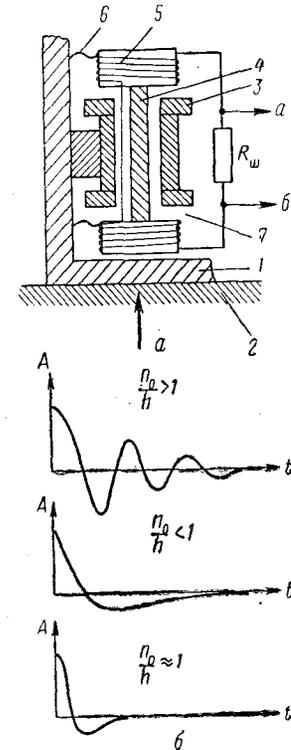


Рис. 109. Схема электродинамического сейсмоприемника (а) и характеристика его затухания (б)

колебаний, распространяющихся в воде, линейные размеры сердечника изменяются, что вызывает в обмотке переменные электрические напряжения.

Основными параметрами, характеризующими работу индукционных сейсмоприемников, являются коэффициент электромеханической связи (КЭМС), собственная частота n_0 и затухание h . Величина КЭМС определяет чувствительность сейсмоприемника и выражается величиной э. д. с. в вольтах, возникающей при скорости 1 см/с перемещения инертной массы. Так, для сейсмоприемников «Светлячок» величина КЭМС равна $0,17 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{см}$, для НС = 3 — $0,6 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{см}$.

Собственная частота n_0 представляет собой частоту свободных колебаний инертной массы, выведенной из состояния равновесия. и представленной самой себе. Она зависит от упругости пружинных подвесок инертной массы.

Затухание h характеризует частоту, с которой инертная масса возвращается в состояние покоя, будучи выведенной из него. Отношение n_0/h называют степенью затухания. Если величина ее больше единицы, то инертная масса при затухании делает большое число периодических колебаний. Если отношение $n_0/h < 1$, то по мере затухания инертная масса совершает аperiodические колебания (рис. 109, б). В том и другом случае требуется длительное время для того, чтобы инертная масса вернулась в состояние равновесия. Теоретически состояние равновесия быстрее всего наступает при $h = n_0$. Такое затухание называют критическим. Практически наилучшие условия для быстрого затухания инертной массы создаются при $h \approx 0,7 n_0$. Это затухание называют оптимальным и настраивают у сейсмоприемников. Его можно добиться, помещая инертную массу в жидкость определенной вязкости, что было характерным для электромагнитных сейсмоприемников, имеющих большую инертную массу. В электродинамических приемниках с легкой инертной массой применяют электромагнитное затухание, оптимальную величину которого подбирают путем изменения шунтирующего сопротивления $R_{ш}$.

Собственная частота сейсмоприемников «Светлячок» составляет 15—30 Гц, а приемников НС-3 и УНЭС — 2 — 5 Гц, поэтому последние называются низкочастотными. Сейсмоприемники плохо принимают вынужденные колебания с частотами, меньшими n_0 , и хорошо принимают колебания с частотами, равными и большими n_0 , осуществляя тем самым своеобразную фильтрацию.

Пьезоэлектрические и магнитострикционные сейсмоприемники характеризуются чувствительностью к изменениям внешнего давления, которая выражается в микровольтах на килограмм-силу на квадратный сантиметр [$\text{мкВ}/(\text{кгс}/\text{см}^2)$], а также величинами h и n_0 . Так, чувствительность керамических приемников составляет 1—2 $\text{мкВ}/(\text{кгс}/\text{см}^2)$. Величины h и n_0 пьезоэлектрических и маг-

нитострикционных сейсмоприемников подбирают путем изменения состава их материала, а также за счет регулирования тепловых потерь в электрических цепях.

3. Усилители

Усилитель записи производит: а) усиление сигналов сейсмоприемника до уровня, достаточного для регистрации на магнитном носителе; б) частотную селекцию (фильтрацию) колебаний; в) изменение коэффициента усиления во времени с целью сокращения динамического диапазона колебаний на выходе усилителя по сравнению с естественным; г) модуляцию колебаний (в станциях с модулированной записью).

Усилитель воспроизведения производит: а) усиление слабых электрических колебаний, снимаемых читающим устройством с промежуточной магнитной записи; б) фильтрацию колебаний с целью выделения на сейсмограмме полезных волн; в) регулирование коэффициента усиления во времени для обеспечения читаемой визуальной записи; г) демодуляцию колебаний (в станциях с записью модулированных колебаний). Усилитель воспроизведения, в отличие от усилителя записи, обладает более обширным набором фильтров, позволяющих найти наилучшую область частот регистрации полезных сигналов. Нередко для воспроизведения используются те же усилители, что и для записи, но только в схему их включают дополнительные фильтры. Кроме того, в них имеются особые корректирующие схемы, компенсирующие частотные искажения сигналов, возникающие при считывании с магнитной пленки.

Широкое применение в сейсморазведке нашли усилители переменного тока на резисторах, снабженные различными системами фильтров. Схема усилителя состоит из нескольких каскадов. При подаче на вход каскада переменного напряжения U_1 некоторой частоты на выходе каскада возникает переменное напряжение U_2 той же частоты. Отношение $U_2/U_1 = K$ характеризует усиление каскада для колебаний данной частоты. Величина коэффициента K зависит от частоты поступающего на вход сигнала. Эта зависимость носит название частотной характеристики. В сейсморазведочных усилителях она подобрана таким образом, чтобы усиление низкочастотных сигналов, связанных с волнами-помехами, было минимальным, а колебания полезных частот имели максимальное усиление. Благодаря этому низкочастотные колебания подавляются, а полезные колебания на выходе усилителя усиливаются в несколько сот тысяч раз.

К сейсмоприемникам поступают колебания различной амплитуды, которая зависит от мощности источника возбуждения колебаний, степени поглощения упругих колебаний в верхних слоях, удаленности и степени неоднородности акустических свойств граничащих сред и других факторов. Поэтому в усилителе имеется схема для регулировки общего коэффициента усиления.

Колебания, поступающие к сейсмоприемникам от неглубоких слоев первыми, имеют большую амплитуду, колебания от глубоких слоев — ничтожную. Это обстоятельство привело к необходимости предусмотреть в схеме усилителя регулировку усиления во времени, с течением приема колебаний. Обычно в первый момент устанавливается небольшой коэффициент усиления, затем он постепенно увеличивается по специальной программе: по закону экспоненты или синусоиды. Такая регулировка называется программной регулировкой усиления (ПРУ).

Для получения хорошо читаемых записей на всем протяжении трассы в аппаратуре имеется автоматическая регулировка усиления АРУ, осуществляемая автоматически в зависимости от амплитуды сигнала на выходном каскаде. Часть этого сигнала отводится в схему АРУ, выпрямляется и подается в качестве отрицательного смещения на сетки ламп, уменьшая коэффициент усиления. Чем выше амплитуда выходного сигнала, тем в большей степени уменьшается коэффициент усиления.

Чтобы не происходило резких изменений коэффициента усиления, которые приводят к сильным нелинейным искажениям записи, в схеме АРУ имеется сглаживающий фильтр, состоящий из конденсаторов и сопротивлений. Благодаря ему коэффициент усиления изменяется плавно с течением времени. Наличие фильтра приводит к тому, что АРУ действует не мгновенно, а с некоторой задержкой, которая характеризуется постоянной времени. Постоянную времени фильтра при внезапном включении сильного сигнала называют временем срабатывания, которое составляет 0,1—0,3 с. Постоянную времени фильтра при внезапном выключении сильного сигнала называют временем отпускания, которое равно 0,2—1 с. Длительность времен срабатывания и отпускания АРУ регулируется путем изменения величин переменных емкостей и сопротивлений.

Благодаря работе АРУ динамический диапазон регистрируемых колебаний на выходе усилителя составляет всего 6—12 дБ, в то время как на входе усилителя он равен 60—70 дБ.

В сейморазведочной станции имеется несколько усилителей, число которых равно числу каналов станции. Если на входы усилителей подать сигналы одинаковых амплитуд, то на выходах нужно иметь напряжения также одинаковых амплитуд. Однако параметры каждого усилителя трудно подобрать одинаковыми. Схемы АРУ работают также неодинаково. Поэтому в схеме каждого усилителя предусмотрена регулировка амплитуд выходного напряжения, с помощью которой подбирают одинаковый уровень амплитуд на всей сейсмограмме.

Сейсмоприемники воспринимают колебания различных частот, однако полезные сигналы находятся в пределах частот от 10 до 200 Гц, причем в зависимости от метода, глубины исследования и литологического состава горных пород разреза диапазон частот полезных сигналов изменяется. Фильтрующее действие усили-

тельных каскадов на резисторах оказывается обычно недостаточно резко выраженным. Кроме того, оно позволяет подавлять высокочастотные колебания, являющиеся во многих случаях помехами. Поэтому усилитель дополнительно снабжают специальной системой фильтров. Она состоит из фильтров нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот. В сейморазведке применяют полосовые фильтры LC , содержащие дроссели и конденсаторы. Фильтр нижних частот подавляет (усиливает с минимальным коэффициентом) электрические сигналы с частотами ниже определенного уровня A . Фильтр верхних частот подавляет колебания с частотами, больше уровня B . Область, расположенную между частотами с уровнями A и B , называют полосой пропускания, а разность граничных частот — шириной полосы пропускания. В пределах полосы пропускания сигналы усиливаются с коэффициентом, величина которого составляет не менее 70% от максимального усиления. Таким образом, фильтры представляют собой устройства, изменяющие коэффициент усиления в зависимости от частоты. График этой зависимости носит название частотной характеристики усилителя (рис. 110). Наклон ветви графика называют крутизной характеристики. Ширину полосы пропускания и среднюю частоту ее можно регулировать, изменяя параметры фильтров (индуктивность и емкость). Имеется возможность изменять крутизну характеристик фильтров.

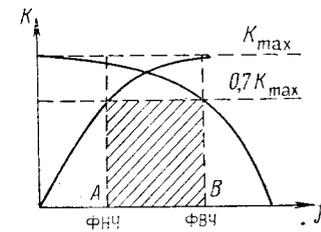


Рис. 110. Частотная характеристика усилителя

4. Регистрирующие устройства

При фотографической записи электрических колебаний в сейморазведочной аппаратуре применяют многоканальные осциллографы, а для магнитной записи — магнитные регистраторы.

В осциллографах электрические сигналы записываются на фотобумаге с помощью зеркального гальванометра. Он состоит (рис. 111, а) из рамки 1 с проводом, подвешенной на растяжках 3 в зазоре между полюсами постоянного магнита. При прохождении через витки рамки электрического тока в ней возникает магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем магнита, стремится повернуть рамку в сторону совпадения магнитных полей рамки и магнита. Поворот рамки уравновешивается упругим моментом растяжек. На одной из растяжек установлено зеркальце 2, на которое падает луч света от осветителя 4. Отразившись от зеркала, пучок света попадает на движущуюся фотобумагу 5, оставляя на ней след. Угол поворота рамки гальванометра пропорционален амплитуде сейсмического сигнала, прошедшего с выхода

усилителя. В зависимости от особенностей оптической системы осциллографа, применяемой при регистрации отраженного блика на светочувствительную бумагу или пленку, возможны различные способы изображения развертки колебаний, которые называются способом переменной амплитуды, способом переменной ширины и способом переменной плотности (рис. 111, б). Осциллограф состоит из блока

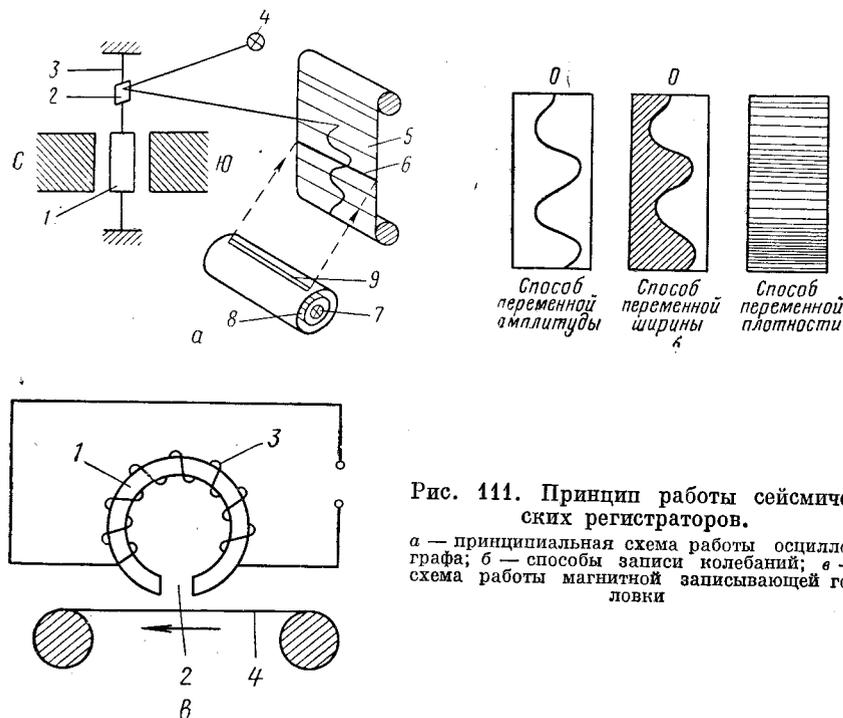


Рис. 111. Принцип работы сейсмических регистраторов.

а — принципиальная схема работы осциллографа; б — способы записи колебаний; в — схема работы магнитной записывающей головки

гальванометров, осветительной системы, маркирующего устройства и лентопротяжного механизма.

В блоках гальванометров установлено от 24 до 72 основных гальванометров карандашного типа, используемых для записи сейсмических трасс. Все гальванометры блока установлены в зазоре между полюсами большого магнита. На каждый гальванометр подается ток от одного из усилителей станции. В результате работы всех гальванометров каждый из них записывает на фотобумаге график изменения сигнала от соответствующего усилителя. Ширина фотобумаги осциллографа 24-канальной станции составляет 15 см.

В осциллографах, кроме записи сейсмических трасс, с помощью специальных гальванометров, производится отметка момента (ОМ) взрыва и запись вертикального времени (ВВ) от сейсмоприем-

ника, установленного около взрывной скважины. На ленте осциллографа с помощью специального осветителя — маркировщика времени — наносятся через каждые 0,01 с поперечные линии б — марки времени. Маркировщик времени состоит из специального осветителя 7, помещенного во вращающемся цилиндре 8. По образующим цилиндра имеется девять узких и одна более широкая щель. Поверх цилиндра 8 надет неподвижный кожух с одной щелью 9. Цилиндр 8 вращается со скоростью 10 об/с, которая контролируется эливарным камертоном или кварцевым генератором, задающими частоту 100 Гц. В процессе вращения цилиндра 8 в моменты совпадения отверстий со щелью 9 (это происходит каждую 0,01 с) на фотобумаге засвечивается поперечная линия, причем каждая десятая из них наносится большей толщины.

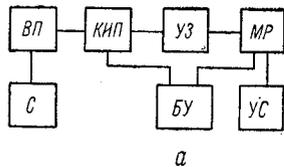
Лентопротяжный механизм протягивает ленту со скоростью от 7 до 50 см/с и приводится в движение электромотором. На осциллографе для визуального наблюдения за блоками гальванометра имеется визуальная шкала.

В магнитных регистраторах электрические колебания записываются на магнитную ленту — ацетилцеллюлозную (синтетическую) пленку, поверхность которой покрыта порошкообразным слоем окиси железа.

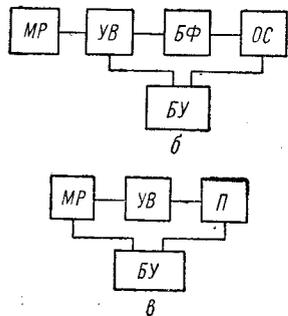
В сейсмических станциях с аналоговой записью применяются барабанные магнитные регистраторы (БМР), которые состоят из барабана для магнитной ленты, блока магнитных записывающих головок, усилителей записи и подмагничивания и схемы управления. Запись электрических сигналов на магнитной ленте выполняется с помощью магнитных головок. Основные магнитные головки, число которых равно количеству каналов станции, записывают электрические сигналы от сейсмоприемников, установленных на профиле наблюдений. С помощью вспомогательных головок осуществляется запись и воспроизведение вертикального времени, запись отметок момента взрыва и марок времени.

Магнитная головка (рис. 111, в) состоит из кольцеобразного металлического сердечника 1 с зазором 2 и обмотками 3. Через концы обмоток 3 пропускается переменный ток, вызванный сейсмическим сигналом, вследствие чего в магнитном зазоре 2 наблюдаются изменения магнитного потока. Против зазора движется магнитная лента 4, которая под действием магнитного потока зазора намагничивается. Величина потока и, значит, намагниченные ленты пропорциональны амплитуде сигнала, пришедшего с выхода усилителя. Ввиду низкой чувствительности ленты к низкочастотным колебаниям одновременно с записью производится ее высокочастотное подмагничивание с помощью генератора синусоидального тока с частотой 4—10 кГц. Под действием токов высокой частоты в ферромагнитном слое разрушается взаимная связь между доменами, благодаря чему они становятся более подвижными и легче ориентируются под воздействием тока низкой частоты.

Магнитная запись сейсмических сигналов является промежуточной. Для дальнейшей обработки она должна быть воспроизведена. Это выполняется тем же магнитным регистратором. При работе его в режиме воспроизведения магнитная лента с записанной информацией движется против магнитных головок, а их выходы подключаются через усилитель станции на осциллограф или на вход специальных преобразователей, предназначенных для автоматической обработки записанных на магнитную ленту сейсмических колебаний.



5. Сейсмические станции и установки с аналоговой записью



Блок-схема станции с аналоговой регистрацией представлена на рис. 112, а. Электрические сигналы от сейсмоприемников *С* через входную *ВП* и контрольно-измерительную *КИП* панели поступают на усилитель записи *УЗ* и после него записываются с помощью магнитных головок на движущейся магнитной пленке магнитного регистратора *МР*. Если запись ведется с частотной модуляцией, между усилителем записи и магнитным регистратором включают частотные модуляторы. Магнитная запись может быть воспроизведена параллельно на осциллографе или последовательно на перописце.

Рис. 112. Блок-схема аналоговой сейсмической станции при записи (а), параллельном (б) и последовательном (в) воспроизведении

При параллельном воспроизведении (рис. 112, б) пленку магнитного регистратора *МР* протягивают мимо магнитных головок. Возникающий в них ток через усилитель воспроизведения *УВ* и блок фильтров *БФ* поступает в шлейфный осциллограф *ОС*, где запись сейсмических колебаний всех каналов воспроизводится на светочувствительную бумагу.

При последовательном воспроизведении (рис. 112, в) магнитную сейсмограмму закрепляют на магнитном барабане специального магнитного регистратора *МР*, на одной оси с которым установлен бумажный барабан с перописцем *П*. В течение одного оборота барабанов магнитная головка воспроизводимой трассы подключена через усилитель *УВ* к катушке перописца, который записывает колебание на бумагу. После каждого оборота с помощью устройства синхронизации происходит смещение перописца и подключение к усилителю магнитной головки следующего канала.

Контрольно-измерительная панель *КИП* станции позволяет контролировать режимы питания электрических цепей, работу усилителей и сейсмоприемников. Узел связи *УС* служит для связи по телефону или радио с пунктами взрыва и передачи отметки момента взрыва для записи на пленку.

Блок управления *БУ* содержит устройства для включения и контроля отдельных узлов станции, кварцевый или камертонный генератор частоты, программный регулятор усиления и другие устройства.

Для работы методом отраженных волн на суше применяются станции с прямой магнитной записью и одновременным воспроизведением «Поиск-1-24-МОВ-ОВ», «Поиск-1-48-МОВ-ОВ», «Поиск-1-72-МОВ-ОВ», имеющие соответственно 24, 48 и 72 канала. Частотный диапазон сейсмического канала 15—125 Гц, динамический диапазон с применением АРУ и ПРУ не менее 90 дБ. Морская станция «Поиск-1-24-МОВ-ОВ» отличается от полевого образца наличием блоков фильтров средних частот, предназначенных для ослабления помех за счет реверберации (отражений упругих волн от поверхности воды), а также дополнительным блоком автоматики для синхронизации работы станции и взрывного устройства.

При работе методом отраженных волн в наземном варианте применяются также станции с последовательным воспроизведением «Поиск-1-24-МОВ-ПВ» и «Поиск-1-48-МОВ-ПВ». В них шлейфные осциллографы заменены перописущим устройством, совмещенным с магнитным регистратором. Частотный диапазон каналов 10—120 Гц, динамический диапазон с применением ПРУ до 100 дБ.

Для работы методом преломленных волн при изучении больших и средних глубин, когда частота регистрируемых колебаний понижается, применяются станции «Поиск-1-24-КМПВ» и «Поиск-1-48-КМПВ». В них используются магнитная запись с частотной модуляцией и параллельное воспроизведение. Частотный диапазон станций 5—125 Гц.

Магнитная запись контролируется визуально с помощью специальной осциллографической трубки.

Для сейсмического каротажа применяется 24-канальная станция «Поиск-1-24-СК». Для приема колебаний используются 12 сейсмоприемников. Шесть из них (контрольные) устанавливаются на поверхности земли около устьев скважины, остальные шесть, составляющие сейсмический зонд, — в скважине в точках наблюдений.

Для регистрации слабых сейсмических сигналов в условиях интенсивных нерегулярных помех разработаны сейсмостанции типа МН, позволяющие при одной стоянке производить накопление информации. Сейсмические сигналы каждого канала записываются магнитной головкой на ленте в виде дорожки шириной 0,1 мм. После регистрации очередного сигнала лента

возвращается в исходное положение, магнитная головка смещается на некоторое расстояние и выполняется следующая запись. В результате полного цикла накопления образуются трассы, состоящие из нескольких синхронных по отношению к моменту взрыва микро-трасс. Затем каждая магнитная головка воспроизводит суммарное действие всех микро-трасс, вследствие чего сигналы-помехи, имеющие нерегулярное распределение колебаний во времени, взаимно ослабляются, а полезные сигналы усиливаются.

Стационарные сейсмические установки применяются для воспроизведения и обработки полевых сейсмических магнитограмм. С помощью установок имеется возможность выполнять считывание записи с магнитной пленки, частотную селекцию записанных колебаний, сдвиг сейсмических трасс относительно друг друга во времени, суммирование колебаний, записанных на различных трассах одной сейсмограммы и на разных сейсмограммах, спектральное разложение сейсмических колебаний, запись колебаний на магнитную пленку, запись колебаний в видимой форме и другие операции.

Считывание записей производится с помощью магнитных головок, расположенных у магнитного барабана, на котором укреплена магнитная пленка с сейсмической записью. Частотная селекция колебаний осуществляется с помощью фильтров. Могут применяться фильтры с параметрами, изменяющимися в зависимости от времени регистрации. Фильтрацию колебаний производят также путем изменения скорости вращения магнитного барабана.

Искусственный временной сдвиг одной трассы относительно другой осуществляется путем сдвига считывающей головки в направлении смещения барабана или с помощью электрической линии задержки. Эта линия представляет собой многозвенный фильтр низких частот, проходя через который сигнал, не изменяя своей формы, задерживается на некоторый интервал Δt .

Суммирование колебаний различных трасс одной сейсмограммы осуществляется путем соединения считывающих головок до входа усилителя воспроизведения или путем наложения трасс на одну или близкие дорожки промежуточного носителя и последующим воспроизведением суммарной трассы.

Окончательный результат преобразований с помощью перо-пишущих и оптических регистраторов представляется в визуализированной форме одним из способов, изображенных на рис. 111, б.

Для суммирования сейсмических записей с линейно распределенными временными сдвигами применяют более простые установки — сумматоры. Они находят наибольшее применение в методе РНП.

6. Сейсмические станции с цифровой магнитной записью

В станциях с цифровой регистрацией сейсмические сигналы записываются на магнитную пленку в двоично-цифровом коде. Принцип работы станций рассмотрим на примере станции ССЦ-2,

блок-схема которой показана на рис. 113. Сигналы от сейсмоприемников через входную и контрольно-измерительную панели (не показаны на рисунке) поступают на блок сейсмических усилителей БСУ. Число усилителей равно числу каналов станций (в станции ССЦ-2 имеется 24 канала). Усилители имеют фильтры нижних и верхних частот, которые обеспечивают полосу пропускания от 9 до 125 Гц. Каждый из усилителей имеет два выхода, коэффициенты которых находятся в соотношении $1:2^n$, где $n = 5-8$.

Программный ключ ПК в течение цикла, равного 2 мс, автоматически подключается сначала к одному, потом к другому, третьему и т. д. усилителям всех каналов станции, производя их поочередный «опрос». Вначале программный ключ подсоединяется к выходу

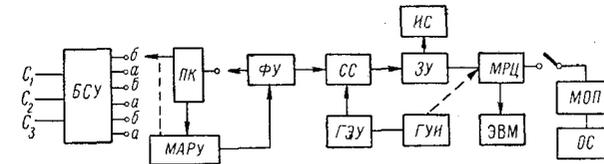


Рис. 113. Блок-схема цифровой сейсмической станции ССЦ-2

б усилителя. Выход б имеет максимальный коэффициент усиления. При этом фиксатор уровня ФУ отключен. Усиленное напряжение с выхода б через программный ключ подается в схему мгновенного автоматического регулятора усиления МАРУ, в котором оно сравнивается с эталонным пороговым напряжением U_n отрицательного и положительного знаков. Величина U_n соответствует такому максимальному сигналу, который может быть записан в виде двоично-цифрового кода на магнитной пленке. Если на выходе усилителя б амплитуда напряжения ниже или равна величине U_n , то программный ключ передает амплитудное значение сигнала A_c в преобразователь аналог — код, состоящий из схемы сравнения СС, генератора эталонных уровней ГЭУ и запоминающего устройства ЗУ.

Генератор эталонных уровней подает в схему сравнения несколько (12) импульсов эталонных напряжений последовательно уменьшающихся амплитуд. Если амплитуда первого эталонного импульса равна A , то второго $A/2$, третьего $A/4$, четвертого $A/8$ и т. д. до величины $A/2^n$, где $n = 12$.

В запоминающем устройстве имеются 12 триггеров, в каждом из которых может быть условно зафиксирована цифра 1 или 0. Вначале амплитуда сигнала A_c сравнивается с амплитудой эталонного импульса A (рис. 114, а). Если $A_c > A$, то на первом триггере запоминается цифра 1. Если $A_c < A$, то на первом триггере запоминается цифра 0, эталонный импульс с амплитудой A снимается из схемы сравнения, а измеряемый сигнал сравнивается с эталонным импульсом с амплитуды $A/2$.

Если же $A_c > A$, то после запоминания первым триггером цифры 1 в схему сравнения подается второй импульс с амплитудой $A/2$ и измеряемый сигнал A_c сравнивается с суммой $A + A/2$. Если $A_c < A + A/2$, то на втором триггере запоминается цифра 1, в схему сравнения подается третий эталонный импульс с амплитудой $A/4$, после чего измеряемый сигнал сравнивается с суммой эталонных сигналов $A + A/2 + A/4$ и т. д. В случае $A_c > A + A/2$ эталонный сигнал $A/2$ снимается из схемы сравнения, куда подается сигнал $A/4$ и измеряемый сигнал A_c сравнивается с суммой $A + A/4$ и т. д.

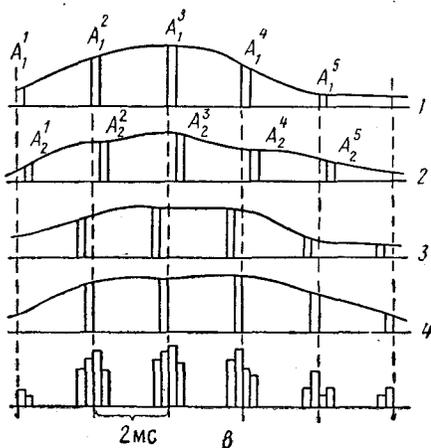
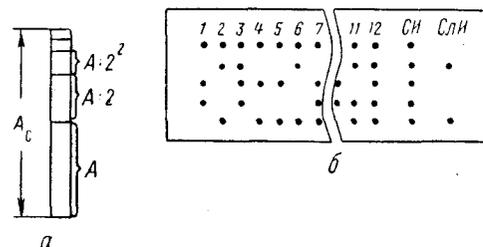


Рис. 114. Принцип цифровой магнитной регистрации в двоично-цифровом коде.

a — измерение сейсмического сигнала в двоичном коде; *б* — принцип записи двоичного числа на магнитной ленте; *в* — схема «уплотнения» сигналов

в течение 80 мкс. В конце измерения величины коэффициентов K_1, \dots, K_{12} с помощью двенадцати магнитных головок цифрового магнитного регистратора МРЦ записываются на магнитную ленту в поперечном направлении (рис. 114, б). Запись ведется на намагниченную ленту, поэтому цифра 0 — соответствует размагниченному участку, цифра 1 — оставшемуся без изменения. Против каждой дорожки записи наносится синхроимпульс СИ, который служит командой на ввод (при вводе содержимого ленты в память ЭВМ). Если при подключении программного ключа к выходу *б* напряжение на нем будет больше величины $U_{\text{п}}$, то

с помощью реле МАРУ программный ключ подключается к выходу *a*, где коэффициент усиления уменьшен в 2^n . Это дает возможность расширить динамический диапазон записи. В цифровой сейсмической станции ССЦ-2 за счет двух выходов усилителей каналов с помощью программного ключа и схемы МАРУ динамический диапазон записи расширяется до 108 дБ.

После подачи 12 эталонных импульсов ГЭУ (см. рис. 113) на триггерах запоминающего устройства будет сделана запись, состоящая из единиц и нулей. Если цифры, записанные триггерами, последовательно обозначить через коэффициенты K_1, K_2, K_3 и т. д. (K_1 — цифра на первом триггере, K_2 — на втором и т. д.), то амплитуда записанного сигнала будет равна

$$A_c = K_1 A + K_2 A/2^1 + K_3 A/2^2 + K_4 A/2^3 + \dots + K_{12} A/2^{12}.$$

Сравнение амплитуды одного сигнала A_c с эталонными продолжается

с помощью реле МАРУ программный ключ подключается к выходу *a*, где коэффициент усиления уменьшен в 2^n . Это дает возможность расширить динамический диапазон записи. В цифровой сейсмической станции ССЦ-2 за счет двух выходов усилителей каналов с помощью программного ключа и схемы МАРУ динамический диапазон записи расширяется до 108 дБ.

После подключения схемы ПК к выходу *a* фиксатор уровня ФУ передает сигнал в схему сравнения, амплитуда которого измеряется и регистрируется аналогично описанному выше. Одновременно с записью кода на магнитную ленту с помощью схемы МАРУ передается специальный служебный импульс СЛИ, который при обработке данных на ЭВМ или при работе схемы преобразователя код — аналог дает команду увеличения записанного результата в 2^n раз.

Программный ключ подключен к одному усилителю в течение 80 мкс, в течение следующих 80 мкс он подключается к выходам следующего усилителя (следующего канала) и т. д. В течение цикла, равного 2 мс, программный ключ ПК опрашивает все двадцать четыре канала и начинает второй цикл очередного опроса каналов. В течение опроса каждого канала фиксатор уровня в один и тот же по отношению к периоду 80 мкс момент времени подключается к выходу программного ключа. Это позволяет избежать ошибок, связанных с изменением амплитуды импульса в течение 80 мкс. Таким образом, сейсмические колебания записываются в виде последовательных мгновенных значений сигнала. Сущность преобразования непрерывного колебания в виде дискретных значений показана на примере четырех каналов (1—4) (рис. 114, в). Так, импульс первого канала зафиксирован мгновенными значениями $A_1^1, A_1^2, A_1^3, A_1^4$ и A_1^5 , импульс второго канала — значениями $A_2^1, A_2^2, A_2^3, A_2^4$ и A_2^5 и т. д. Так как время опроса одного канала (80 мкс) по сравнению с циклом опроса всех 24 каналов незначительно и позволяет в течение цикла 2 мс опросить все каналы, то это позволяет уплотнить запись на магнитной пленке. Очередность поступления кодированных импульсов на магнитный регистратор показана на рис. 114, в. На ленте, записываются коды отметки момента и номера взрыва, вертикального времени и другие коды служебных импульсов. При поступлении в ЭВМ запись расшифровывается, заносится в память и по определенной программе подвергается обработке и интерпретации.

Наряду с магнитной записью, в станции имеется световая индикация сигналов лампочками, число которых равно числу разрядов. Светящаяся лампочка означает 1, потухшая — 0. Она позволяет визуально контролировать преобразования и регистрацию сигналов в двоично-цифровом коде, а также помогает настройке аппаратуры, в частности, проверке схемы преобразования аналог — код.

Дискретная запись с помощью преобразователя код — аналог. может быть преобразована в аналоговую форму и записана на осциллографе с использованием систем АРУ и ПРУ.

§ 61. МЕТОДЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Основными методами изучения геологического строения в сейсморазведке являются метод отраженных волн (МОВ) и метод преломленных волн (МПВ), регистрирующие продольные волны в диапазоне частот 30—70 Гц.

Особенно важные результаты метод отраженных волн дает при наличии в разрезе и протяженных границ раздела волновых сопротивлений. Запись колебания, вызванного отраженной от некоторой границы волной, называют отражением. Отражение представляет собой импульс, имеющий несколько максимумов и минимумов. Каждый из них называют фазой отражения и различают первую, вторую фазы и т. д. отражения. Сравнивая между собой соседние трассы, можно найти на них одинаковые фазы одного отражения. Процесс сравнения и прослеживания одинаковых фаз колебаний на соседних трассах называют фазовой корреляцией, а линию, соединяющую одинаковые фазы одной волны на соседних трассах, — осью синфазности. Поскольку ось синфазности отображает зависимость времени пробега волны от положения на сейсмограмме трасс, отвечающих разным точкам наблюдения, форма оси синфазности при неизменном положении источника близка по форме к годографу отраженной волны.

Отражения от мелкозалегающих горизонтов обычно не удается проследить, поскольку они приходят вслед за интенсивными прямой или первой преломленной волнами, амплитуда которых в сотни и тысячи раз превышает амплитуду отраженной волны. Поэтому с помощью метода отраженных волн имеется возможность изучать разрез на глубинах 0,2—4 км, а в некоторых районах до 10 км. При условии применения мощных взрывов для возбуждения колебаний и специальных методических приемов их регистрации удается регистрировать волны от глубинных слоев земной коры.

Наиболее отчетливо отражения регистрируются на участке, где отсутствуют преломленные волны. Поэтому наблюдения в методе отраженных волн ведут на небольшом удалении (1,5—2,5 км) от пункта взрыва, а с целью подавления волн-помех (поверхностной и звуковой) взрывы производят в специально пробуренных скважинах.

Метод отраженных волн позволяет изучать сейсмические горизонты с углами наклона до 40—50°. Однако наилучшие результаты получаются при углах наклона границ 3—15°.

Для определения глубины залегания отражающих (и преломляющих) границ необходимо знать среднюю скорость v_{cp} в толще

пород, лежащих выше границы. В случае плоско-параллельных слоев средняя скорость определяется средневзвешенным значением скорости всех слоев. Средняя скорость может быть получена по данным сейсмокаротажа в скважинах. Такие скважины имеются далеко не всегда, и поэтому величина v_{cp} часто не известна. Однако по осям синфазности может быть вычислена так называемая эффективная скорость $v_{эф}$. Это имеет важное значение, потому что в большинстве районов величины $v_{эф}$ и v_{cp} отличаются незначительно и для интерпретации может быть принята эффективная скорость.

Большую помеху для метода отраженных волн представляют многократно-отраженные волны. С целью получения высококачественных записей однократно отраженных волн, отображающих положение реальных сейсмических границ, в районах с сильными мешающими многократными отражениями широко применяется метод общей глубинной точки (ОГТ). Метод ОГТ заключается в проведении многократных независимых наблюдений по профилю при различном расположении источников и приемников и последующем суммировании полученных трасс. При этом каждая суммарная трасса представляет собой сумму записей, содержащих отражения, от одного общего элемента B отражающих границ, полученных при нескольких различных сочетаниях пунктов взрыва $O_1—O_7$ от приемников $C_1—C_7$ (рис. 115). Число независимых наблюдений (перекрытий) в методе ОГТ составляет от 4—6 до 24 и более. Поэтому, когда средние скорости однократной и многократных волн, приходящих одновременно, отличаются между собой, то на суммарных трассах многократные отражения относительно ослабляются, а однократные усиливаются. Для этого исходные данные должны быть получены при существенно разных удалениях источника и приемника. Поэтому наблюдения в методе ОГТ проводят на расстояниях до 2—5 км от источника.

Метод преломленных волн применяется для изучения слоев мощностью не менее 50—100 м, скорость в которых больше, чем в каждом вышележащем. По результатам наблюдений определяют глубину залегания верхней границы слоя и граничную скорость v_r .

Регистрацию преломленных волн производят на некотором удалении от источника. Причем, протяженность зон отсутствия преломленных волн тем больше, чем глубже залегает преломляющая граница. Таким образом, по мере удаления от пункта

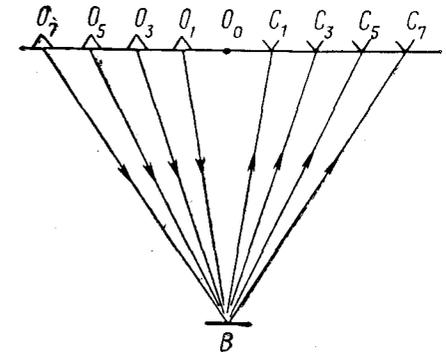


Рис. 115. Схема работы по методу общей глубинной точки

взрыва число наблюдаемых преломленных волн возрастает и на поверхности земли наблюдаются волны, преломленные во все более глубоких слоях. Обычно метод применяется для изучения преломляющих границ на глубинах от нескольких метров до 1,5—2 км.

Годографы преломленных волн от нескольких параллельных границ пересекаются между собой. Это означает, что на некоторых участках профиля возникают зоны наложения (интерференции) волн. Это создает затруднения при корреляции преломленных волн. Участок записи, где данная волна наблюдается первой, называют зоной первых вступлений данной волны. Проще всего наблюдать преломленные волны в зоне первых вступлений, так как вызванные ими колебания в этом случае регистрируются только на фоне слабых микросейсмических колебаний почвы. Однако далеко не всегда преломленная волна имеет зону первых вступлений. Поэтому преломленные волны наблюдают в основном вне зоны первых вступлений, но там, где отсутствует наложение волн, с последующим выполнением фазовой корреляции. В зонах наложения раздельное прослеживание преломленных волн зачастую невозможно. В простых геологических условиях, когда имеется одна — две преломленные волны, связанные с сильными преломляющими границами, применяют упрощенный вариант МПВ — способ первых вступлений. Способ первых вступлений широко применяется при инженерно-геологических изысканиях.

Корреляционное прослеживание волн является основным в методе преломленных волн. По годографам МПВ нельзя определить среднюю скорость в толще, покрывающей преломляющую границу. Поэтому обычно в комплексе с методом преломленных волн проводят определение средних скоростей в скважинах или эффективных скоростей методом отраженных волн.

Метод преломленных волн применяют для прослеживания неглубоко расположенных зон разлома, изучения сред с вертикальными границами раздела, а также для регионального изучения строения земной коры.

Кроме описанных выше основных методов отраженных и преломленных волн, в сейсморазведке применяются другие методы и модификации: метод проходящих волн, методы поперечных и обменных волн, пьезоэлектрический метод.

Метод проходящих волн широко применяется при наблюдениях в скважинах и получил название сейсмического каротажа в обычном (интегральном) и дифференциальном вариантах. В интегральном варианте измеряют время пробега волны от источника на поверхности земли до некоторых точек в скважине. Это позволяет определить среднюю скорость, но не дает возможности детально изучить разрез. В дифференциальном варианте измеряют время пробега волны между двумя или несколькими точками скважины, что позволяет подробно изучить скоростной

разрез и выделить тонкие отражающие или преломляющие слои. На измерении скорости пробега высокочастотной волны между двумя точками скважины основан акустический каротаж.

В сейсмокаротаже главное внимание обращают на регистрацию четких вступлений волны. Дальнейшим развитием сейсмокаротажа является вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), при котором регистрируют всю совокупность колебаний, возбужденных источником, расположенным на поверхности Земли. Это позволяет определить природу и особенности волн, наблюдаемых в методах отраженных и преломленных волн.

В методах поперечных и обменных волн применяют горизонтальные сейсмоприемники, а в случае наблюдения поперечных монотипных волн применяют особую методику возбуждения колебаний. Скорость распространения поперечных волн меньше, чем у продольных, а верхняя часть разреза для них более однородна. Это позволяет повысить точность определения сейсмических границ и в комплексе с наблюдением продольных волн получать более полные сведения о геологическом разрезе.

Пьезоэлектрический метод основан на наблюдении пьезоэлектрического эффекта, проявляющегося в горных породах, когда составляющие их кристаллы деформируются упругими волнами. Наиболее четко такой эффект наблюдается у кристаллов кварца, поэтому метод применяется при поисках и разведке кварцевых жил и пегматитовых тел.

§ 62. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Взаимное расположение пунктов взрыва и сейсмоприемников называют в сейсморазведке системой наблюдения. Наблюдение ведут обычно вдоль профилей, представляющих собой прямые или ломаные линии. В зависимости от взаимного расположения пунктов взрывов и приемников различают следующие типы профилей: продольные, непродольные, дуговые (рис. 116). Если пункты взрыва *ПВ* и сейсмоприемники *С* располагаются на одной прямой, то профиль называют продольным (рис. 116, а). Если же сейсмоприемники располагаются на линии, не проходящей через пункт взрыва, профиль называют непродольным (рис. 116, б). Когда сейсмоприемники расположены по дуге окружности, центр которой совпадает с пунктом взрыва, профиль называют дуговым (рис. 116, в).

Отраженные и преломленные волны, образовавшиеся на одной границе раздела вне зависимости от положения пунктов взрыва, называют волнами одного класса. Система наблюдений должна создавать возможность прослеживания волн одного класса на достаточном протяжении, что позволит изучать положение сейсмических границ.

Сейсмические границы могут быть прослежены непрерывно на всем их протяжении или дискретно в отдельных точках профиля. В первом случае говорят, что выполняется непрерывное, а во втором — дискретное профилирование или сейсмондирование. Непрерывное профилирование применяют для прослеживания сложных и слабых сейсмических границ, дискретное — чтобы проследить хорошо выдержанные сильные сейсмические границы.

Участок профиля, занимаемый сейсмоприемниками, называется стоянкой сейсмоприемников. Длина стоянки s зависит от числа n каналов станции и расстояния Δx между соседними сейсмоприемниками, т. е.

$$s = (n - 1) \Delta x.$$

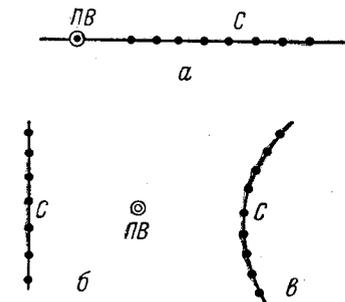


Рис. 116. Типы профилей.
а — продольный; б — не продольный; в — дуговой

Сейсмоприемники устанавливают на одинаковом расстоянии Δx , равном 20—50 м. Оно выбирается таким образом, чтобы можно было уверенно проследить одни и те же фазы полезных волн на соседних трассах.

1. Системы наблюдений в методе отраженных волн

Расстояние L между пунктом взрыва и наиболее удаленным от него сейсмоприемником, регистрирующим взрыв из этого пункта, называют длиной годографа. Чем больше глубина до отражающей границы, тем большим обычно выбирают расстояние L . При малой длине годографа по сравнению с глубиной залегания отражающей границы затрудняется подавление кратных волн и вычисление $v_{эф}$. Слишком большая длина годографа приводит к появлению на записях преломленных волн, что затрудняет корреляцию отражений и снижает эффективность подавления кратных волн. В простых сейсмогеологических условиях $L = 200 \div 800$ м. В сложных условиях, когда необходимо ослабить кратные волны, применяется метод ОГТ. Длина годографа в методе ОГТ достигает 4—5 км.

Участок профиля, расположенный между двумя соседними пунктами взрыва, называют взрывным интервалом. В простых условиях длина взрывного интервала l выбирается равной L . В сложных условиях величину l уменьшают иногда до 100—200 м.

Наиболее подробные сведения о геологическом строении района позволяет получать система непрерывного профилирования, которая применяется главным образом при проведении площадной съемки. При простом непрерывном профилировании и пункты взрыва O_1, O_2 и т. д. располагаются вдоль

профилей на постоянном расстоянии один от другого (рис. 117, а). При взрыве в пункте O_1 сейсмоприемники располагают последовательно по всему интервалу O_1O_2 , обеспечивая тем самым получение отражений от границы между лежащими на ней точками R_1 и R_2 . При взрывах в пункте O_2 сейсмоприемники устанавливают последовательно на интервалах O_1O_2 и O_2O_3 . При этом получают отражения от точек границы, лежащих соответственно между точками R_2 и R_3, R_3 и R_4 . Переходя далее к пункту взрыва O_3 и производя наблюдения на взрывных интервалах O_2O_3 и O_3O_4 , прослеживают участок отражающей границы вправо от точки R_4 и т. д. Такая система создает возможность непрерывного исследования отражающей границы вдоль профиля произвольной длины.

Когда взрыв производится в точке O_1 , а сейсмоприемник находится в точке O_2 , время распространения волны вдоль ломаной линии $O_1R_2O_2$ равно времени распространения волны вдоль луча $O_2R_2O_1$, которое отсчитывается, если взрыв осуществляется в точке O_2 , а приемник расположен в точке O_1 . Точки O_1 и O_2 при такой системе наблюдений называются взаимными. Пары точек O_2 и O_3, O_3 и O_4 и т. д. также являются взаимными точками. Сопоставляя время отражений во взаимных точках, можно отождествлять отражения, принадлежащие одному и тому же отражающему горизонту.

При описанной системе наблюдений для волн одного класса может быть построен ряд годографов, изображенных на рис. 117, а. Здесь Γ_1 — годограф, полученный при взрыве в точке O_1, Γ_2 — при взрыве в точке O_2 и т. д. Годографы, полученные при взрывах

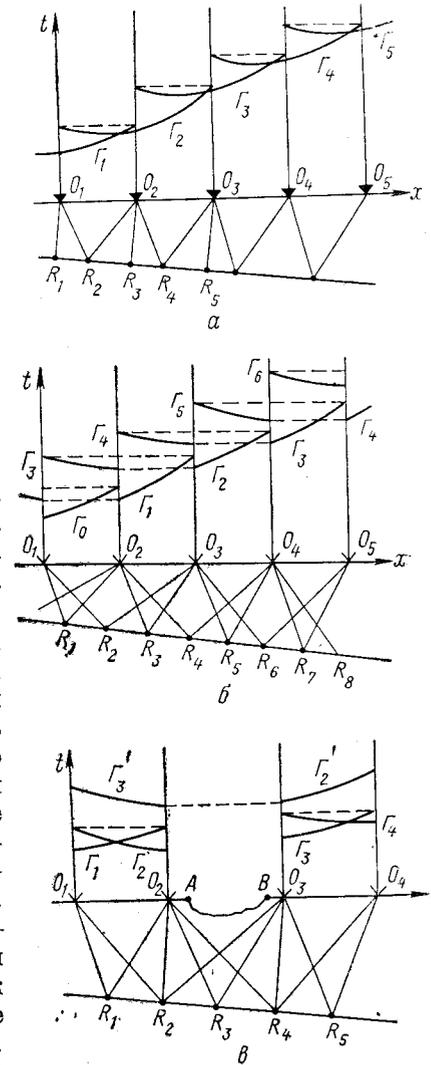


Рис. 117. Системы простого непрерывного профилирования (а), через один интервал (б) и удлиненных годографов (в)

в соседних пунктах, оказываются связанными между собой во взаимных точках (пунктирные линии).

Нередки случаи, когда система простого непрерывного профилирования не может быть применена из-за невозможности регистрации отражений на близких к пункту взрыва расстояниях. Причиной этого являются интенсивные поверхностные волны, которые возникают во многих районах, или мощные звуковые волны, возбуждаемые при взрывах в воздухе, шурфах или мелких скважинах. В таких условиях регистрация отраженных волн возможна лишь при некотором удалении сейсмоприемников от пункта взрыва, где на отражения от интересующих нас горизонтов не накладываются помехи. В этих условиях применяют систему непрерывного профилирования через один, два, три и более взрывных интервалов.

Система непрерывного профилирования через один интервал (рис. 117, б) заключается в следующем. При взрывах в точке O_1 сейсмоприемники устанавливаются непрерывно в пределах взрывного интервала O_2O_3 , при взрывах в точке O_2 приемники располагают на интервалах O_3O_4 , при взрывах в точке O_3 — на интервалах O_1O_2 и O_4O_5 и т. д. Таким образом, при взрывах в точке O_1 прослеживается отрезок отражающей границы R_1R_2 , при взрывах в точке O_2 — отрезок R_3R_4 , а при взрывах в точке O_3 — отрезки R_2R_3 и R_5R_6 , при взрывах в точке O_4 — отрезки R_4R_5 и R_7R_8 и т. д. В результате применения такой системы отражающая граница прослеживается непрерывно. Здесь также присутствуют пары взаимных точек, что можно заметить при рассмотрении лучей $O_1R_1O_2$, $O_1R_2O_3$, $O_2R_3O_4$, $O_2R_4O_5$, $O_3R_5O_4$ и т. д. Сравнивая время прихода отраженных волн во взаимных точках, можно, как и в предыдущем случае, отождествлять отражения одного класса. Получаемые в этом случае годографы отраженных волн увязаны между собой во взаимных точках. Индекс годографа совпадает с индексом пункта, при взрывах в котором прослеживается данный годограф.

В сложных сейсмогеологических условиях, когда отражения прослеживаются с трудом, для повышения точности разведки применяют систему непрерывного двойного перекрытия (профилирования). Такая система позволяет дважды проследить одни и те же отражающие границы, используя для этого две независимые системы годографов. Если на одной из систем годографов качество отражений ухудшается, то имеется возможность построения отражающей границы на соответствующем участке с использованием второй системы годографов. В некоторых случаях применяют систему полупростого непрерывного профилирования (чередование пунктов простого и двойного профилирования). Оно применяется для одновременного прослеживания отражений от мелко и глубоко залегающих границ. Участки годографов, удаленные за пределы близлежащего к пункту взрыва интервала, используют для повыше-

ния точности построения разрезов для глубоко залегающих горизонтов.

Нередко при работе вдоль непрерывных профилей встречаются недоступные для наблюдения участки, например, пересечения рек, болот и т. п. В этих случаях применяют систему удлинённых годографов (рис. 117, в). Так, при взрывах в точке O_2 наблюдения производят между точками B и O_4 , прослеживая участок отражающей границы R_3R_4 , а при взрывах в точке O_3 наблюдения ведут между точками A и O_1 , прослеживая участок R_2 и R_3 .

Для получения сведений о пространственном положении отражающих границ (в стороне от линии расположения пунктов взрыва) применяют системы не продольного профилирования. С этой целью наблюдения ведут вдоль коротких не продольных профилей, направленных под углом к основному. Если позволяет рельеф местности, не продольные профили располагают перпендикулярно к основному профилю, пересекающему не продольный по середине взрывного интервала (рис. 118, б) Длина не продольного профиля должна быть близка к длине взрывного интервала. Если не продольный профиль направлен по простиранию структуры, то расстояние между сейсмоприемниками на нем увеличивается по отношению к расстоянию на основном профиле.

Если по каким-либо причинам отражения могут регистрироваться только на сравнительно коротком участке, расположенном вдали от пункта взрыва, применяют систему сопряженных не продольных профилей. В этом случае на местности разбивают два параллельных профиля I и II на расстоянии d один от другого. На обоих профилях через равные расстояния и в шахматном порядке располагают пункты взрыва (рис. 118, а). При взрывах в пункте O_2 профиля II наблюдения ведут на интервале O_1O_3 профиля I , а при взрывах в пункте O_3 профиля I наблюдения ведут на участке O_2O_4 и т. д. Это создает систему непрерывно увязанных между собой годографов на обоих сопряженных профилях.

Система сейсмозондирования позволяет определять глубину и наклон отражающих границ, а также вычислять по годографам отраженных волн эффективные скорости. Сейсмозондирования применяют при рекогносцировочной съемке.

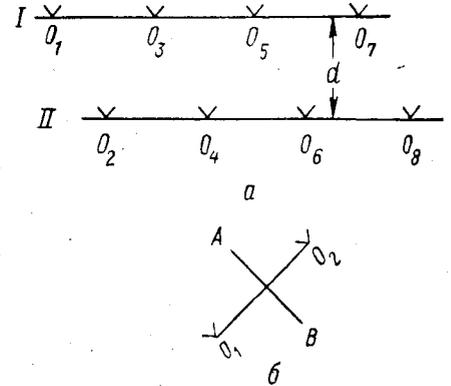


Рис. 118. Расположение сопряженных (а) и не продольного (б) профилей

Различают линейное и площадное (крестовое) сейсмозондирование. Линейное сейсмозондирование представляет собой изолированный короткий профиль, на котором расположено 2—3 взрывных интервала. Площадное зондирование состоит из пересекающихся коротких продольных профилей или сочетания продольных и непродольных профилей.

В методе ОГТ применяют системы многократного перекрытия (профилирования), позволяющие непрерывно проследить сейсмические границы. Кратность прослеживания и определяет степень сложности такой системы. Различают центральные и фланговые системы многократного перекрытия. Центральные системы наблюдения проводят на участках, прилегающих к источнику по обе стороны от него. Фланговые системы применяют при больших удалениях от источника. Используют различные виды фланговых систем: примыкающую к пункту взрыва или с выносным источником. Максимальное расстояние взрыв — прибор определяется по различию эффективных скоростей однократной и многократной волн. Обычно оно составляет 1,5—2,5 км. В методе ОГТ шаг наблюдений выбирают равным 100 м.

2. Системы наблюдений в методе преломленных волн

При работе методом преломленных волн наблюдения производят на некотором удалении от пункта взрыва, так как вблизи него имеется зона отсутствия преломленных волн. Отрезок, на котором при данном положении пункта взрыва можно проводить наблюдения, называют зоной прослеживаемости преломленных волн. Отрезок профиля, на котором при данном положении пункта взрыва фактически производят наблюдения, называют участком прослеживания преломленных волн.

При необходимости прослеживания преломленных волн нескольких слоев для каждой из них (зная ориентировочно их скорости и возможные глубины залегания слоев) строят годографы и на их основе выбирают участки прослеживания волн, в которых у годографов отсутствуют взаимные пересечения. Окончательный выбор участков прослеживания производят по наблюдаемым годографам в процессе опытных работ.

Уверенная интерпретация результатов метода преломленных волн возможна лишь при наличии двух встречных годографов, относящихся к одному участку преломляющей границы и полученных при взрывах по обеим сторонам этого участка. Изображенная на рис. 119, а система встречных годографов Γ_1 и Γ_2 , которые получены соответственно при взрывах в пунктах O_1 и O_2 , позволяет уверенно изучить границу на отрезке N_1N_2 . Здесь участку N_1N_2 преломляющей границы соответствуют отрезки C_1A_2 и A_1C_2 встречных годографов. Они увязаны во взаимных точках O_1 и O_2 .

С целью распознавания годографов, полученных из разных пунктов взрыва и относящихся к одной и той же границе раздела, в методе преломленных волн применяют нагоняющие системы, позволяющие получать нагоняющие годографы — годографы, полученные на одном участке при взрывах в двух пунктах, расположенных по одну сторону от участка. Форма годографа преломленной волны зависит от формы преломляющей границы, величины скоростей в преломляющей границе и покрывающей толще и не зависит от глубины залегания границы. Так, на рис. 119, б годографы Γ_1 и Γ_2 на участке CB профиля получены при взрывах соответственно в пунктах O_1 и O_2 , расположенных по одну сторону от этого участка. Величина Δt в любой точке i участка BC определяется по формуле

$$\Delta t = t_{O_2, i} - t_{O_1, i}.$$

Поскольку участок пути $O'i$ является общим для обоих лучей, следовательно, $\Delta t = t_{O_2, O'} - t_{O_1, O'}$ величина постоянная. Это означает, что годографы Γ_1 и Γ_2 на участке BC подобны (параллельны). Годограф Γ_2 называют нагоняющим по отношению к годографу Γ_1 , а годограф Γ_1 — нагоняемым по отношению к годографу Γ_2 .

Подобие годографов от одной и той же границы R позволяет продлить годограф Γ_1 в область зоны отсутствия преломленной волны вблизи пункта взрыва O_1 путем параллельного смещения годографа Γ_2 на величину Δt в противоположном направлении. Подобие нагоняющих годографов используется как важный признак при распознавании годографов, полученных из разных пунктов взрыва и относящихся к одной и той же преломляющей границе.

Для непрерывного прослеживания преломленных волн вдоль протяженного профиля применяют полные корреляционные системы. Они аналогичны системам непрерывного профилирования МОВ. Для непрерывного прослеживания преломляющих границ применяются системы непрерывного профилирования через один, два, три и более интервалов. Интервалы, в которых ведется наблюдение преломленных волн, выбираются в области их прослеживаемости. Если зоны прослеживаемости волн разных классов не совпадают, то применяют на основе

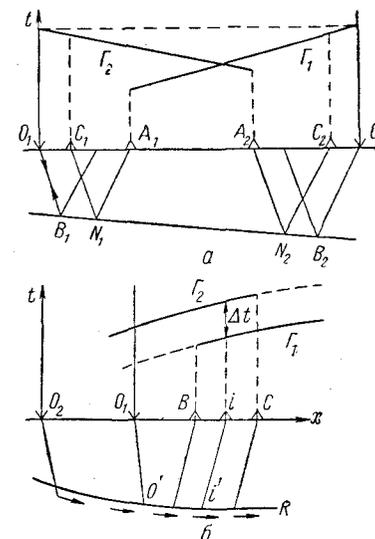


Рис. 119. Системы встречных (а) и нагоняющих (б) годографов преломленных волн

3. Условия приема и возбуждения упругих колебаний

отмеченных систем комбинированные полные корреляционные системы.

В простых условиях разведки при наличии интенсивных преломленных волн, хорошо различающихся по форме записи и по величинам кажущихся скоростей, применяют более простые системы наблюдений, в которых волны одного класса распознаются не путем непрерывной фазовой корреляции, а путем сравнения формы записи и сопоставления нагоняющих годографов. Такие системы называются *неполными корреляционными системами*. Они применяются как при непрерывном профилировании, так и при сейсмозондированиях. Неполная корреляционная система непрерывного профилирования, состоящая из встречных и нагоняющих годографов, позволяет составлять с помощью увязки во взаимных точках нагоняющих годографов сводные прямые и обратные годографы преломленных волн. В результате их обработки можно непрерывно определять величину граничной скорости на всем протяжении профиля и обнаруживать ее изменения.

В условиях, когда имеются опорные преломленные волны, хорошо различающиеся между собой по кажущейся скорости, и граничная скорость не испытывает резких изменений вдоль профиля, применяют неполную корреляционную систему из нагоняющих годографов. В ней увязка осуществляется по признаку подобия нагоняющих годографов, а величина v_r в пределах каждого взрывного интервала принимается постоянной. Нагоняющий годограф совместно с нагоняемым наблюдают на отрезке, составляющем 20—30% длины полезного участка прослеживания каждого годографа.

Для прослеживания одного опорного преломляющего горизонта применяют методику точечных зондирований, при которой наблюдения производят по неполным корреляционным системам, состоящим из встречных или нагоняющих годографов. В них прослеживание преломленных волн производят на изолированных участках, включающих взаимные точки.

Систему *непродольных профилей* в методе преломленных волн применяют для изучения крутопадающих нарушений, трассирования линий тектонических нарушений, а также при площадной разведке для изучения пространственного расположения преломляющих границ в стороне от продольного профиля. Различают *поперечные профили*, когда перпендикуляр, опущенный из пункта взрыва на линию профиля, проходит через непродольный профиль, и *боковые*, когда перпендикуляр пересекает продолжение линии профиля. Наибольшее распространение имеют поперечные профили. Наблюдения на непродольном профиле позволяют определить лишь относительные превышения преломляющей границы вдоль линии профиля, поэтому непродольные профили сочетают обычно с продольными.

Выбор условий упругих колебаний приема направлен на регистрацию полезных волн.

С этой целью применяют селекцию (фильтрацию) колебаний по частоте и направленности путем группирования сейсмоприемников. Обычно полезные волны и волны-помехи различаются по частоте. Так, поверхностные волны имеют максимум в области низких частот (10—20 Гц). Отражения от тонких неглубоких пластов имеют высокочастотный, а отражение от мощных глубокозалегающих пластов — низкочастотный спектры. В сейсмических станциях имеется возможность установить необходимую полосу пропускания сигналов, т. е. установить рабочую фильтрацию.

В станциях с воспроизводимой регистрацией основная часть работы по выбору оптимальной фильтрации выполняется при лабораторной перезаписи магнитограмм. В полевых условиях применяют лишь фильтры для подавления колебаний той области частот, где присутствуют только помехи, с тем, чтобы не допустить перегрузки магнитной ленты.

Для подавления волн-помех, частота которых близка к частоте полезных волн, применяют *группирование сейсмоприемников*: выходы сейсмоприемников в группе соединяют последовательно и подключают к одному из каналов станции. Полезные волны, приходящие к группе сейсмоприемников с больших глубин, имеют примерно одинаковую фазу, ибо фронт плоской волны будет близок к горизонтالي и подходит почти одновременно. Нерегулярные случайные помехи приходят к приемникам с разными фазами. Поэтому суммарная амплитуда полезных сигналов последовательной группы сейсмоприемников будет усиливаться, а суммарная амплитуда помех — уменьшаться. Если группу сейсмоприемников установить по прямой линии, то будут подавляться волны-помехи, распространяющиеся вдоль нее. Для ослабления помех, распространяющихся по различным направлениям, применяют *площадное группирование сейсмоприемников*, устанавливая их в виде правильных геометрических фигур.

Большое значение при ослаблении волн-помех имеют ориентировка и условия установки сейсмоприемников. В результате преломления на нижней границе зоны малых скоростей (ЗМС) фронты полезных волн, приходящих снизу, имеют небольшой угол с горизонтом, а лучи близки к вертикали. В сейсморазведке используют в основном продольные волны, при падении которых на поверхность почвы происходят главным образом ее вертикальные перемещения. Сейсмоприемники устанавливают вертикально, что позволяет не воспринимать горизонтальные смещения почвы, создаваемые поверхностными, поперечными и другими мешающими волнами. При необходимости регистрации поперечных волн применяют горизонтальные приемники. При сейсморазведочных

работах большую роль играют поверхностные геологические условия.

Верхний рыхлый слой почвы интенсивно поглощает колебания с высокими частотами. Чтобы избавиться от его влияния, сейсμοприемники устанавливают в ямах глубиной 0,2—1 м. Это предохраняет их также от воздействия дождя, ветра и т. п. Сейсμοприемник должен плотно соприкасаться с почвой всей площадью своего основания. Неустойчивое положение сейсμοприемника может стать причиной собственных колебаний корпуса, что сильно исказит запись полезных волн. На болотистых участках и в оврагах ввиду интенсивных собственных колебаний корпуса сейсμοприемника применяют поперечное или площадное группирование их, устанавливают приборы на кольца, вбитые на глубину 1,5—2 м или в ящики с песком с большой площадью основания.

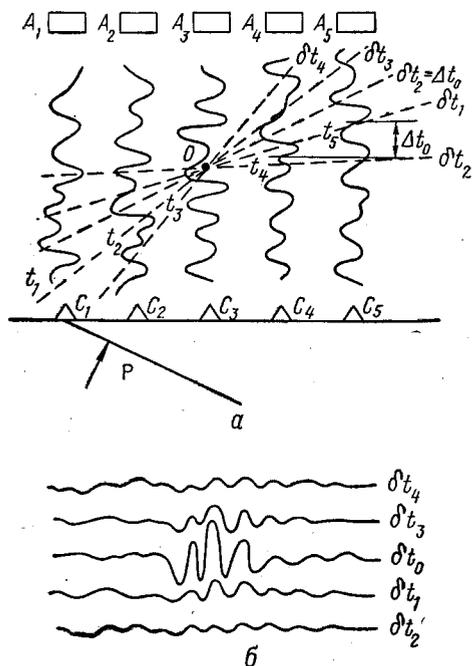


Рис. 120. К пояснению сущности регулируемого направленного приема. а — схема суммирования трасс, б — суммоленга с выделенной волной

ность его заключается в следующем (рис. 120, а). Пусть под некоторым углом к профилю, где через равные расстояния расположены сейсμοприемники, приходит волна P . В моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 фронт волны достигнет соответственно сейсμοприемников C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 и со сдвигом Δt_0 волна P будет записана на пяти трассах магнитной ленты. При визуальном просмотре трасс волна P выделяется неотчетливо. Но если полученные трассы суммировать, расположив считывающие магнитные головки $A_1—A_5$ со сдвигом Δt_0 (для данной скорости протяжки ленты), т. е. параллельно линии $\delta t_0 = \Delta t_0$, то на суммоленге (рис. 120, б) будут получены максимальные амплитуды колебаний, соответствующие волне P . При других сдвигах считывающих головок амплитуды суммарных колебаний будут меньше, по-

скольку фазы суммирующихся нерегулярных колебаний не совпадают. По мере приближения сдвига δt головок к величине Δt_0 амплитуды суммарных записей увеличиваются.

Полевую запись, где временные сдвиги волн неизвестны, воспроизводят многократно, каждый раз располагая магнитные головки с различным временным сдвигом. В результате получают суммоленгу, в различных частях которой полезные волны выделяются возрастом суммарных записей.

Метод РНП позволяет интерпретировать сложные записи в зонах интерференции волн и тем самым изучать геологическое строение сложных объектов — соляных куполов, вулканических структур, тектонических нарушений и т. п.

Для возбуждения упругих колебаний в сейсморазведке используют в основном взрывы, которые производят в скважинах, шурфах или на поверхности земли, а также невзрывные источники.

В качестве заряда используются тротил, порох, динамит. При изучении малых глубин (20—100 м) применяют тротил массой 100 г. При исследовании глубин до 10 км масса заряда возрастает до 20 кг. В методах глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) масса зарядов достигает нескольких сотен килограммов.

С увеличением массы зарядов возрастает амплитуда сейсмических колебаний, в спектре которых начинают преобладать волны низких частот.

В зависимости от соотношения длины зарядов l и их диаметра d они подразделяются на сосредоточенные ($l/d = 4$), удлиненные ($l/d > 4$) и плоские ($l/d < 4$).

Наиболее эффективными и экономичными являются взрывы в скважинах, которые бурят глубиной до 30—40 м. Заряды в скважины (обычно удлиненные) помещают в плотной бумаге или резиновых мешочках, — располагают их на 2—3 м ниже зоны малых скоростей и заливают сверху водой или глинистым раствором.

Погружение заряда на некоторую глубину позволяет снизить интенсивность поверхностных волн и устранить звуковые волны, которые являются помехами, особенно при регистрации отражений. Расположение зарядов ниже зоны малых скоростей позволяет избежать поглощения энергии прямой волны, что наблюдалось бы в случае расположения зарядов в ЗМС.

Частотный спектр волн, возникающих при взрыве, зависит от литологического состава и физического состояния пород, в которых производится взрыв, а также от массы заряда. Самые низкие частоты возникают в рыхлых сухих породах — песках, супесях. Эти породы мало пригодны для производства в них взрывов. При взрывах в очень крепких породах (известняках, кристаллическом сланце, льде) возникают колебания очень высокой частоты, которые быстро поглощаются по мере распространения в толще земной коры и поэтому приводят к уменьшению глубинности метода. В связи с этим обычно избегают производства взрывов в крепких породах. Наилучшие результаты дают взрывы

в увлажненных пластичных породах, особенно в глинах, влажных песках, плывунах.

Взрывы в шурфах и на поверхности земли менее эффективны, чем скважинные. Масса зарядов при создании такой же интенсивности волны в 20—30 раз больше, чем в скважинах. Кроме того, здесь возникают интенсивные помехи за счет звуковых и поверхностных волн. При взрывах в шурфах и на поверхности применяют плоские заряды, которые помещают в водонепроницаемые мешки и засыпают влажным песком.

Взрывы в воздухе применяют в методах МПВ для исследования глубин до 1 км и МОВ для изучения глубин до 5 км. Вблизи пункта взрыва создается интенсивная звуковая волна, в связи

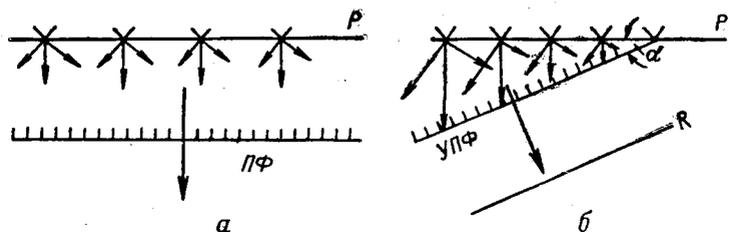


Рис. 121. Схема группирования взрывов по методике плоского фронта (а) и управляемого плоского фронта (б)

с чем регистрировать отраженные волны удастся лишь на некотором удалении от пункта взрыва.

В районах, где много рек и озер, эффективным и экономичным средством возбуждения упругих колебаний являются подводные взрывы.

В сейсморазведке часто применяют группирование взрывов, т. е. одновременный или разновременный (с небольшим запаздыванием) взрыв нескольких зарядов, расположенных в различных точках.

При групповом одновременном взрыве зарядов, расположенных в некоторой плоскости P (рис. 121, а), усиливаются те колебания, фронт которых параллелен этой плоскости. Волны, фронты которых направлены под углом к плоскости P , взаимно подавляются. В результате создается мощная плоская волна, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном к плоскости P . На этом основана методика плоского фронта ПФ, применяющаяся для прослеживания горизонтальных и слабо наклонных отражающих границ.

Если взрывы в группе источников производить последовательно, через равные интервалы времени (рис. 121, б), то образуется плоская волна, фронт которой наклонен к плоскости P под некоторым углом α . Меняя интервал следования взрывов и их очередность, можно менять угол α , т. е. управлять наклоном плоского фронта. На этом принципе в сейсморазведке основана

методика управляемого плоского фронта УПФ, позволяющая изучать отражающие границы с разными углами наклона.

Помимо эффекта направленности, группирование взрывов создает статистический, сейсмический эффекты и эффект осреднения. Статистический эффект группового взрыва заключается в том, что нерегулярные волны, возбужденные взрывом каждого заряда, имеют неодинаковую фазу. Поэтому суммарная их амплитуда при увеличении числа зарядов в группе возрастает медленнее, чем амплитуда полезных волн, имеющих близкую фазу. Осредняющий эффект проявляется в том, что чем на большее число мелких зарядов разделен большой заряд, тем меньше различия сейсмогеологических условий в окрестности каждого заряда сказываются на форме суммарной волны. Сейсмический эффект проявляется в том, что амплитуда суммарного полезного колебания при групповом взрыве оказывается большей, чем амплитуда полезного колебания при взрыве одного заряда той же суммарной массы.

В зависимости от расположения зарядов по линии или на некоторой площади различают соответственно линейное и площадное группирование взрывов. В линейном группировании различают продольное (вдоль прямой линии, совпадающей с направлением профиля наблюдений) и поперечное (перпендикулярное к этому направлению) группирование. При площадном группировании заряды располагают на некоторой площади в виде различных правильных геометрических фигур. В зависимости от массы отдельных зарядов, входящих в группу, различают однородные (при одинаковом весе всех зарядов) и неоднородные группы. Наибольшее применение находят однородные группы.

В зависимости от конкретных условий и задач сейсмических работ стремятся использовать те или иные эффекты группирования взрывов. При работах МОВ для подавления помех в виде поверхностных волн используют направленное действие групповых взрывов; для подавления случайных помех, возбуждаемых взрывом, используют статистический эффект, применяя площадные группы из нескольких десятков зарядов. При разведке больших глубин МПВ для получения четких записей волн стремятся путем поперечного или площадного группирования повысить сейсмический эффект взрыва.

В морской и речной сейсморазведке для возбуждения упругих колебаний применяются магнестрикционные, электрогидравлические, индукционные, детонирующие и пневматические излучатели колебаний.

Магнестрикционный излучатель (рис. 122, а) состоит из ферромагнитного сердечника с обмоткой, которая питается от генератора I переменного тока. При прохождении тока наблюдается магнестрикционный эффект: линейные размеры сердечника изменяются с удвоенной частотой, т. е. он начинает вибрировать.

Сердечник, погруженный в воду, будет излучать поле упругих колебаний. Сердечник для повышения мощности и направленности обычно имеет Ш-образную или О-образную форму. О-образные сердечники для преобразования цилиндрической волны в плоскую помещаются в отражательный конус (рис. 122, б).

Магнитоотрицательные излучатели в рабочем положении крепятся на кронштейне к борту или носу судна или врезаются в дно судна. Они могут применяться также и в качестве приемников колебаний.

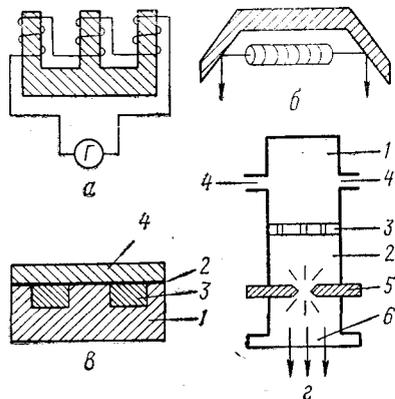


Рис. 122. Излучатели колебаний звуковых частот.

а, б — магнитоотрицательные; в — индукционный, г — детонирующий

Излучатель создает волны в диапазоне частот от 100 до 1500 Гц.

Индукционный излучатель (бумер) (рис. 122, в) состоит из плоской катушки 3 с медной лентой, установленной в корпусе 1. К плоской поверхности катушки через тонкий слой 2 изоляции прикреплена толстая алюминиевая мембрана 4.

При пропускании через катушку мощного электрического импульса от искрового разрядника в мембране индуцируются вихревые токи Фуко, которые создают вторичное поле. Вследствие взаимодействия первичного и вторичного полей возникают силы, отталкивающие мембрану от катушки. Мембрана, отталкиваясь, создает в воде импульс упругих колебаний. Искровой разрядник питается накопительной емкостью.

Детонирующий излучатель (рис. 122, г) представляет собой металлический цилиндрический сосуд, состоящий из смесительной 1 и взрывной 2 камер, разделенных газопроницаемым фильтром 3. В смесительную камеру через патрубки 4 поступают отдельно пропан (бутан) и кислород. Смесь газов, имеющая высокое давление, через фильтр 3 заполняет камеру 2. После этого с помощью электродов 5, между которыми возникает искра, смесь воспламеняется и устремляется в открытый конец камеры 6, производя

мощный импульс упругих колебаний. При объеме камеры 25 л взрыв эквивалентен взрыву 100 г тротила. Частота наиболее интенсивной части спектра импульса составляет 30—70 Гц. Взрывы повторяются через 0,5—1 с.

Пневматический излучатель представляет собой стальной цилиндр, внутри которого имеются две камеры высокого и низкого давлений. Их разделяет поршень, который периодически открывает и закрывает выходное отверстие камеры высокого давления. В камеру высокого давления подается воздух от компрессора. Давление регулируется от 100 до 250 кгс/см². Когда с помощью поршня открывается выходное отверстие, сжатый воздух за короткое время истекает в воду, создавая упругие колебания, равноценные по энергии колебаниям от взрывов тротила весом от 10 до 50 г. Спектр излучаемого сигнала регулируется путем изменения скорости истечения воздуха. Интервал между выхлопами может составлять от 3 до 10 с.

§ 63. ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Полевые сейсморазведочные работы выполняет сейсмическая партия. В состав ее входит геодезическая, буровая, сейсмическая и взрывная бригады и камеральная группа.

Геодезическая бригада разбивает профили на местности, определяет высотные отметки пунктов взрыва и точек установки сейсмоприемников, осуществляет привязку профилей к государственной опорной сети.

Буровая бригада занимается бурением скважин для производства в них взрывов (взрывных скважин) в соответствии с избранной системой наблюдений. Взрывную скважину располагают на линии профиля или на расстоянии до 10—20 м от линии профиля в перпендикулярном ему направлении. Когда на одном пункте взрыва используют последовательно несколько скважин, то их располагают на расстоянии 5—15 м одна от другой перпендикулярно к профилю. Глубина взрывных скважин должна превышать мощность зоны малых скоростей, а забой скважины находится в коренных породах ниже уровня грунтовых вод. Исходя из этого требования, глубина взрывных скважин колеблется в основном в пределах от 5 до 25 м и реже достигает 100 м. Диаметр скважин выбирается в пределах 88—125 мм. После завершения бурения скважину тщательно промывают, заполняют водой, а устье закрывают глиняной пробкой толщиной 15—20 см.

Взрывная бригада подготавливает и производит взрывы в строгом соответствии с правилами техники безопасности. Руководит бригадой взрывник, имеющий документы на право ведения взрывных работ. Для производства взрывов используют взрывные машинки, специально предназначенные для сейсмических работ. Машинки состоят из омметра для проверки моментной и боевой линий, взрывного устройства и приспособлений для передачи момента взрыва по телефонной линии или по радио. Боевая линия

соединяет схему машинки с электродетонатором, который вместе с зарядом опускается в скважину. Моментная линия соединяет схему взрывной машинки со схемой аппаратуры сейсмостанции. Если управление взрывом производится импульсом магнитного регистратора, то боевая магистраль подключается к схеме сейсмостанции.

Электродетонатор представляет собой картонную или латунную трубку, наполненную воспламеняющимся составом и чувствительным взрывчатым веществом (ВВ), например гремучей ртутью. В трубку введены два медных проводника, соединенных внутри нее тонким проводником (мостиком) из вольфрама или константана. Медные проводники подключают к боевой магистрали.

Когда с помощью взрывной машинки через мостик пропускается импульс тока, мостик накаливается, окружающий его состав воспламеняется и происходит взрыв чувствительного ВВ. На сейсмограмме с помощью моментной линии отмечается разрыв мостика детонатора.

При плохом качестве детонаторов взрыв заряда может происходить с опозданием на 0,004—0,02 с после момента разрыва мостика, что снижает качество материалов. Поэтому применяется и другой способ передачи момента взрыва. В этом способе на заряд надевается петля. Она подсоединяется к моментной линии, в цепь которой включены батарея и сопротивление. Концы моментной линии через трансформатор подключают к телефонной линии, идущей к сейсмостанции. При взрыве моментная линия разрывается и отмечается на сейсмограмме.

Заряды опускают в скважину с помощью грузила (железного стержня на толстой веревке) или деревянных шестов. После погружения заряда в скважину взрывную магистраль проверяют при помощи омметра. Убедившись в исправности взрывной линии, скважину заливают водой до краев. Взрывник сообщает оператору о готовности произвести взрыв. Перед взрывом взрывник обязан удалить всех людей и убрать оборудование (автоцистерну, насос) на безопасное расстояние от скважины. Взрыв производится по команде оператора, переданной по телефону или радио. По команде «Огонь» взрывник, находящийся в укрытии, приводит в действие взрывную машинку. После взрыва извлекают из скважины боевую магистраль, моментную линию и грузило, и готовят оборудование и скважину к проведению следующего взрыва.

Когда взрывы производятся в водоемах, то, получив распоряжение оператора, взрывник погружает заряд на дно или подвешивает на поплавке на указанную глубину в намеченной точке водоема. При взрывах в шурфах взрывник засыпает шурф с зарядом землей и плотно ее утрамбовывает.

Сейсмическая бригада расставляет сейсмоприемники на профиле и получает полевые сейсмограммы.

К проведению собственно сейсмических работ на профиле приступают после подготовки взрывных скважин. Одновременно

с бригадой сейсмической станции на профиль прибывает и взрывная бригада. Работы этих бригад проводят параллельно под руководством оператора. По прибытию обеих бригад на профиль в первую очередь устанавливают связь между станцией и пунктами взрыва. Для этого используется телефонная связь или радиосвязь. Линия связи между станцией и пунктом взрыва обеспечивает не только служебные переговоры, но и передачу сигналов отметки момента взрыва и вертикального времени. До прибытия сейсмической станции на профиле протягивают косу и устанавливают сейсмоприемники. При работе с одиночными сейсмоприемниками их устанавливают в специальные ямки глубиной от 20 см до 1 м. При работе с группами сейсмоприемников каждый прибор устанавливают в ямку или втыкают штырем в почву. Кабели, соединяющие сейсмоприемники со станцией (косы), прокладывают вдоль стоянки. Косы располагают таким образом, чтобы сейсмоприемник, колебания которого регистрируются на первой (верхней) трассе сейсмограмм, располагался ближе к концу профиля. Сейсмоприемники нумеруют, и один и тот же прибор или группу приборов всегда присоединяют к одному и тому же каналу станции. Все приборы устанавливают вертикально и одинаково ориентируют по профилю.

Сейсмостанцию устанавливают примерно посередине стоянки, в 10—20 м в стороне от профиля, чтобы сейсмоприемники не регистрировали помехи, создаваемые при работе станции. Кабели, ведущие к сейсмоприемникам, и линию связи присоединяют к соответствующим входным колодкам станции. Одновременно станцию заземляют.

После установления связи с пунктами взрыва оператор запрашивает сведения о состоянии и глубине взрывных скважин и, основываясь на этих данных и опыте работ, дает указание взрывникам изготовить заряды определенной массы. Далее он проверяет с помощью контрольно-измерительной панели правильность соединений и исправность линий, устанавливает чувствительность каналов таким образом, чтобы влияние микросейсм было минимально, устанавливает необходимые условия приема колебаний, фильтрации, смешения, систем регулирования усиления. Изготовив заряды, взрывник сообщает об этом оператору. Если сейсмостанция подготовлена, он дает команду «Опустить заряд в скважину». Погрузив заряд, взрывник докладывает оператору: «Заряд опущен на такую-то глубину». Оператор включает все узлы станции, проверяет работу отметки момента взрыва и, убедившись, что все узлы станции работают нормально, дает распоряжение о прекращении движения людей, транспорта вблизи сейсмоприемников. Далее оператор подает команду о производстве взрыва. Она состоит из трех слов: «Приготовиться», «Внимание», «Огонь». При работе со станциями с барабанными магнитными регистраторами время подачи команд оператор должен согласовывать с вращением барабана и действием релейных схем. При работе с рулонными

регистраторами оператор дает команды с интервалами 2—3 с.

Перед командой «Огонь!» оператор включает двигатель лентопротяжного механизма. Взрывник получает команду, поворачивает ключ взрывной машинки. В боевой магистрали возникает импульс тока, под действием которого срабатывает электродетонатор, взрывая заряд. Импульс тока одновременно по линии связи подается на регистрирующее устройство, для отметки момента взрыва. После регистрации колебаний оператор воспроизводит запись на осциллографе или перописце, чтобы убедиться в хорошем качестве записи. Только после этого к станции подключают сейсмическую косу от новой стоянки сейсмоприемников (или перемещают последние на новое место) и производят запись сейсмических колебаний от следующего взрыва.

После окончания рабочего дня оператор сдает сейсмограммы в камеральную группу.

Перед началом и периодически в процессе полевых работ проверяют идентичность сейсмических каналов, работу систем АРУ, смесителя и других устройств сеймостанции. Для проверки идентичности каналов сейсмоприемники или их группы устанавливают на дно специальной канавки, выкопанной перпендикулярно к линии профиля. Каждый приемник или их группу подключают к входу соответствующего усилителя, далее в каждом канале задают одинаковые параметры усиления и регистрируют колебания почвы, которые возбуждают недалеко от сейсмоприемников небольшими взрывами или ударами кувалды. Затем оценивают идентичность по прямой записи на осциллограф и по воспроизводимой записи.

Различают фазовую и амплитудную идентичность каналов. Каналы считаются идентичными по амплитуде, если соответствующие амплитуды сигналов, записанные в каждом канале, различаются между собой не более, чем на 6 дБ. Каналы идентичны по фазе, если сдвиг одинаковых точек амплитуд любых двух каналов не превышает 8% от видимого периода записи.

Идентичность канала в целом создается путем задания необходимых характеристик, обеспечивающих идентичность сейсмоприемников, усилителей и регистрирующих устройств. Если сигналы, прямо записанные на осциллограф, идентичны, а сигналы после воспроизведения неидентичны, значит, нарушения идентичности происходят в схеме магнитного регистратора. Проверку идентичности усилителей проводят путем записи на осциллограф сигналов генератора низкой частоты, подключенного к запараллеленным входам усилителей. Идентичность работы гальванометров проверяют путем подачи на их запараллеленные входы сигнала от сейсмоприемника. Проверка идентичности сейсмоприемников практически совпадает с проверкой идентичности канала в целом. Чтобы обеспечить идентичную работу сейсмоприемников, их подбирают таким образом, чтобы чувствительности не отличались более, чем на 25%, периоды собственных колебаний не отлича-

лись бы более, чем на 10%, а отношение амплитуд двух соседних экстремумов записи собственных колебаний было равно 7—10.

Кроме фазовой и амплитудной идентичностей производится контроль других параметров регистрирующей аппаратуры. К ним относятся взаимные влияния между каналами, точность работы маркировочных устройств, постоянство скорости движения магнитной ленты и др.

§ 64. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Обработка и интерпретация материалов сейсморазведки состоит из следующих этапов: оформление документации, оценка и трансформация сейсмограмм, вычисление статических поправок; вычисление средних, эффективных и граничных скоростей; построение временного разреза; построение сейсмических (глубинных) разрезов; составление структурных карт.

Построение временного разреза выполняется с помощью аналоговых и цифровых обрабатывающих установок в центральном камеральном бюро (ЦКБ) экспедиции или конторы. Остальные этапы обработки выполняются в сейсмических партиях. В ЦКБ также уточняются данные статических и кинематических поправок и скоростей в покрывающей толще.

Документация сейсмограмм перезаписей заключается в их строгом учете и заполнении паспорта, куда заносятся сведения о привязке сейсмограммы или перезаписи, об условиях ее получения и другие данные.

Преобразование сейсмограмм заключается в их перезаписи с целью ослабления мешающих колебаний по сравнению с полезными. Это достигается путем перезаписи, с применением частотной селекции (фильтрации), АРУ и суммирования трасс.

При построении временных разрезов на аналоговых и цифровых машинах, помимо описанных преобразований, вводят кинематические поправки, а также выполняют другие операции.

Визуализированные преобразованные сейсмограммы служат для корреляции волн и построения годографов.

1. Обработка сейсмограмм, корреляция волн, введение поправок и составление годографов

Над каждой второй трассой левее первых вступлений надписывают расстояние в метрах от пункта взрыва до соответствующего приемника или их группы. Затем приступают к маркировке сейсмограмм, т. е. разбивке шкалы отсчета времени. За нулевую принимают первую марку времени справа от отметки момента взрыва (рис. 123, а). Если момент вступления не совпадает с маркой времени, то слева от нуля приписывается положительная поправка за момент взрыва в миллисекундах. Марки, кратные

0,02 с, отмечают точками, а марки, кратные 0,1с, — цифрами 1, 2, 3. Пользуясь полученной шкалой, отмечают и выписывают на

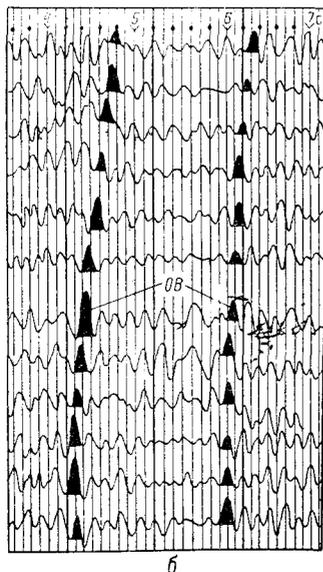
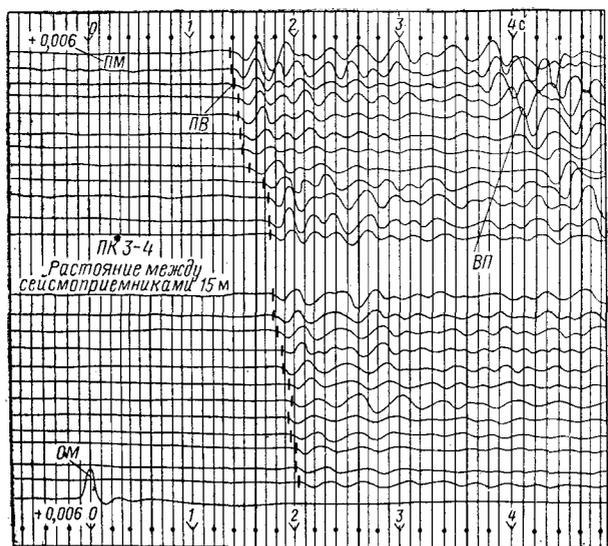


Рис. 123. Сейсмограммы с записью преломленных (а) и отраженных (б) волн.

ПВ — первые вступления преломленной волны; ВП — запись волн-помех; ОМ — отметка момента взрыва; ПМ — поправка за момент взрыва; ОБ — коррелируемые отраженные волны

ленте времена первых вступлений. Отмечают момент вступления вертикального времени по трассе, записанной от сейсмоприемника, установленного вблизи взрывной скважины.

Корреляция волн выполняется на основании сравнения амплитуд, фаз и формы колебаний волны, записанных на различных сейсмических каналах. Принципы выделения волн показаны на рис. 123, б. Линию, соединяющую одинаковые фазы на различных трассах сейсмограммы, называют осью синфазности. Сигналы, относящиеся к одной волне, отмечают на сейсмограмме штрихами или через амплитудные значения проводят жирные цветные линии, где каждый цвет отвечает определенной волне.

После корреляции волн определяют по маркам времени на каждой трассе время t_i прохождения волны от пункта взрыва до сейсмоприемника или группы сейсмоприемников данного канала. В полученные величины t_i вносят статические поправки (за влияние зоны малых скоростей (ЗМС), рельефа местности, за точку взрыва и фазу), величина которых зависит только от положения точек наблюдения и возбуждения.

Поправка за зону малых скоростей вводится для исключения запаздывания волн, возникающего вследствие наличия верхнего рыхлого слоя. При внесении поправок за ЗМС предполагают, что лучи полезных волн в ее пределах направлены вертикально. Это предположение обычно оправдывается вследствие резкого различия между скоростями волн в ЗМС и подстилающих ее коренных породах.

Если взрыв производят под нижней границей ЗМС, то поправка Δt_3 за влияние ЗМС вычисляется способом вертикального времени по формуле

$$\Delta t_3 = t_B - \frac{h_c}{v},$$

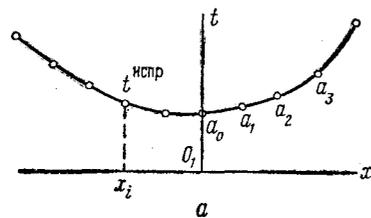
где t_B — время, отмечаемое сейсмоприемником, стоящим около устья взрывной скважины; h_c — глубина заряда в скважине; v — скорость в подстилающих зону коренных породах.

Скорость v определяется по наклону годографов первых вступлений на сейсмограмме МОВ.

Способ вертикального времени применяется при таких системах наблюдений, когда регистрация сейсмограмм производится вблизи пункта взрыва. Применяются и другие способы вычисления Δt_3 : по двум встречным годографам первых вступлений МПВ при небольшом (100—200 м) расстоянии между пунктами взрыва или по результатам сейсмокаротажа взрывных скважин. В точках профиля, где поправка Δt_3 не может быть найдена описанными способами, ее вычисляют путем линейной интерпретации графика поправок, построенного по точкам, где величины Δt_3 были определены. Вычисленная поправка Δt_3 вычитается из соответствующей величины t_i .

Поправка за рельеф учитывает искажающее влияние на оси синфазности неодинаковой высоты установки сейсмоприемников. Для внесения поправок за рельеф линии профиля используют данные нивелировки сейсмических профилей или

топографические карты. На их основании строят нивелировочные разрезы вдоль всех сейсмических профилей. Для каждого профиля выбирают линию приведения. Ее рассматривают как линию, на которой производились наблюдения и располагались точки взрыва. Поправка за рельеф в предположении, что лучи



полезных волн вертикальны, вычисляется по формуле

$$\Delta t_p = h_c/v,$$

где h_c — расстояние по вертикали от действительной точки расположения сейсмоприемника до линии приведения; v — скорость распространения упругих волн в коренных породах.

Поправку Δt_p алгебраически вычитают из времени t_i .

Поправка за точку взрыва Δt_b вводится для исключения искажений, внесенных в годограф вследствие того, что точка взрыва не находится на линии приведения или лежит внутри зоны малых скоростей. Если забой скважины находится ниже кровли коренных пород, то поправку вычисляют по формуле

$$\Delta t_b = h_b/v,$$

где h_b — расстояние по вертикали от точки взрыва до линии приведения.

Рис. 124. Построение годографа отраженной волны (а), вертикального годографа и графика средних скоростей (б)

Если точка взрыва расположена выше линии приведения, то поправка Δt_b отрицательна, если ниже — положительна.

Поправка за фазу Δt_ϕ учитывает промежуток времени между первым вступлением волны (моментом прихода ее к сейсмоприемнику) и фазой, по которой выполнена корреляция волны. Для вычисления поправки выбирают среди трасс сейсмограммы такие, на которых отчетливо заметно вступление данной волны, и определяют разность времени вступления и коррелируемой фазы. Среднее арифметическое из нескольких определений принимают в качестве поправки Δt_ϕ . Поправка Δt_ϕ вычитается из величины t_i .

Исправленные значения $t_i^{\text{испр}}$, полученные по формуле

$$t_i^{\text{испр}} = t_i - \Delta t_s - \Delta t_p \mp \Delta t_b - \Delta t_\phi,$$

используются при построении годографов волн.

Годографы строят следующим образом. Для данного пункта взрыва O_1 , начало которого совпадает с началом координат, по оси абсцисс x откладывают расстояние от пункта взрыва до сейсмоприемников, по оси ординат — время $t_i^{\text{испр}}$, соответствующее абсциссе x . Полученные таким образом точки $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ являются точками годографов (рис. 124, а).

Годографы совместно с другими геологическими и сейсмическими данными являются исходным материалом для вычисления эффективной и граничной скоростей, глубин залегания сейсмических (отражающих и преломляющих) границ и других сейсмогеологических характеристик изучаемых сред.

2. Обработка материалов сейсмокаротажа

По данным сейсмокаротажа строят вертикальный годограф, графики средних и пластовых скоростей на основе изучения распределения времен первых вступлений прямой волны на трассах, соответствующих скважинным приемникам. Рассмотрим простой случай обработки данных сейсмокаротажа, когда глубина взрывной скважины постоянна и пункт взрыва находится около устья изучаемой скважины. В этом случае, принимая время t_k первого вступления, регистрируемого контрольным сейсмоприемником около устья взрывной скважины, за нулевое, определяют исправленные времена $t_{\text{испр}}$ вступлений, зафиксированных сейсмоприемниками скважинных приборов, по формуле

$$t_{\text{испр}} = t_{\text{наб}} - t_k,$$

где $t_{\text{наб}}$ — наблюдаемые времена вступлений сейсмоприемников.

Далее по оси ординат (рис. 124, б) откладывают глубины z , на которых расположены сейсмоприемники, а по оси абсцисс соответствующие величины $t_{\text{испр}}$ первых вступлений. Полученные точки соединяют прямыми отрезками и получают вертикальный годограф сейсмокаротажа. Если в каждой точке годографа вычислить отношение $v_{\text{ср}} = \frac{z}{t}$, то получим график зависимости средних скоростей от глубины z . Истинная скорость v в каждой точке годографа может быть вычислена по формуле

$$v = \Delta z / \Delta t,$$

где Δz и Δt — очень малые величины. Эта формула справедлива, если волна распространяется вдоль ствола скважины. В ином случае эта формула позволяет найти лишь кажущуюся скорость.

Пласты с одинаковой скоростью выделяются на вертикальном годографе одинаковым его наклоном. Это позволяет определить пластовые скорости $v_{\text{пл}}$. Так, для пласта h_2

$$v_{\text{пл}} = \frac{h_2}{t_2 - t_1} = \frac{h_2}{\Delta t_2}.$$

Средняя скорость v_{cp} на основании имеющихся значений пластовых скоростей вычисляется по формуле:

$$v_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{t_n} = \frac{H}{t_n},$$

где H — суммарная мощность толщи из n пластов; t_n — суммарное время пробега волны в толще.

3. Определение эффективной и граничной скоростей по годографам отраженных и преломленных волн

По годографам отраженных волн можно определить эффективную скорость горных пород, залегающих выше отражающей границы. Эффективной скоростью называют скорость в покрывающей толще, вычисленную по годографам отраженных волн при допущении, что среда между сейсмической границей и поверхностью земли однородна, а сейсмическая граница плоская. В случае горизонтальной отражающей границы уравнение годографа отраженной волны имеет вид:

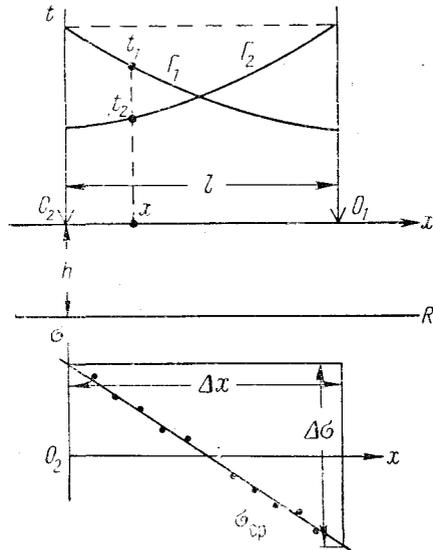


Рис. 125. Определение эффективной скорости по способу встречных годографов

Взяв две точки годографа с абсциссами x_1 и x_2 и соответствующими им ординатами t_1 и t_2 , получим систему уравнений с двумя неизвестными $v_{эф}$ и h , из которой, исключая h , можно определить $v_{эф}$. Такой способ может содержать большую погрешность, связанную с определением отдельных точек на годографе, поэтому им в практике не пользуются. Обычно применяют способы, использующие по возможности много точек годографа или два встречных годографа. Они позволяют надежно определять $v_{эф}$ ввиду их статистичности, т. е. использования полной кривой годографов.

Наиболее простым и распространенным является способ встречных годографов (рис. 125). Если из пунктов взрыва O_1 и O_2 , расположенных на расстоянии l , получены два встречных, увязанных во взаимных точках годографа отраженных волн Γ_1 и Γ_2

уравнение годографа отраженной волны имеет вид:

$$t = \frac{1}{v_{эф}} \sqrt{4h^2 + x^2}.$$

Взяв две точки годографа с абсциссами x_1 и x_2 и соответствующими им ординатами t_1 и t_2 , получим систему уравнений с двумя неизвестными $v_{эф}$ и h , из которой, исключая h , можно определить $v_{эф}$. Такой способ может содержать большую погрешность, связанную с определением отдельных точек на годографе, поэтому им в практике не пользуются. Обычно применяют способы, использующие по возможности много точек годографа или два встречных годографа. Они позволяют надежно определять $v_{эф}$ ввиду их статистичности, т. е. использования полной кривой годографов.

то их уравнения в случае горизонтальной отражающей границы имеют вид

$$t_1^2 = \frac{1}{v^2} (4h^2 + x^2),$$

$$t_2^2 = \frac{1}{v^2} [4h^2 + (l-x)^2].$$

Найдем функцию

$$\sigma = t_1^2 - t_2^2 = \frac{1}{v^2} [4h^2 + x^2 - 4h^2 - (l-x)^2] = \frac{1}{v^2} (2xl - l^2).$$

Продифференцируем ее по x :

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{1}{v^2} 2l \approx \frac{\Delta\sigma}{\Delta x}.$$

Отсюда

$$v = v_{эф} = \sqrt{2l \frac{dx}{d\sigma}} \approx \sqrt{2l \frac{\Delta x}{\Delta\sigma}}. \quad (37)$$

Таким образом, функция $\sigma = t_1^2 - t_2^2$ позволяет определить величину $v_{эф}$. Практически для ее определения промежутки O_1O_2

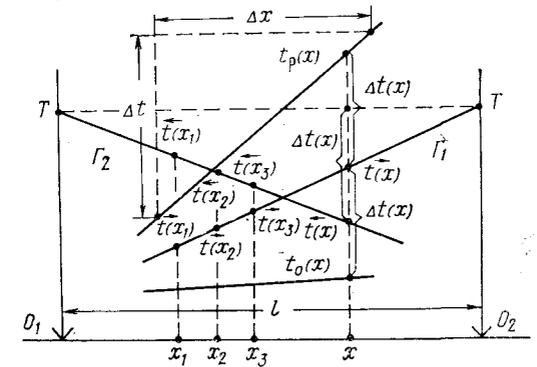


Рис. 126. Определение граничной скорости и преломляющей границы по системе встречных годографов

разбивают на ряд интервалов, в пределах которых можно считать поведение годографа прямолинейным, т. е. принять, что $d\sigma/dx \approx \Delta\sigma/\Delta x$. Затем в точках границ интервалов находят величину $\sigma = t_1^2 - t_2^2$. Через эти точки проводят линию σ_{cp} и определяют отношение $\Delta\sigma/\Delta x$, которое и позволяет вычислить величину $v_{эф}$. Формула справедлива и для слабо наклонных ($7-10^\circ$) отражающих границ.

Система встречных годографов преломленных волн позволяет определить граничную скорость v_r . Пусть Γ_1 и Γ_2 — встречные годографы (рис. 126) преломленных волн, увязанные во взаимных точках. Найдем разностный годограф

$$t_p(x) = \vec{t}(x) + [T - \vec{t}(x)] = \vec{t}(x) + \Delta t(x),$$

где $\vec{t}(x)$ и $\overleftarrow{t}(x)$ — время по прямому и встречному годографам; T — время над пунктами взрыва для взаимных годографов.

Если угол наклона преломляющей границы составляет $10-15^\circ$, то

$$\frac{dt_p(x)}{dx} = \frac{d\vec{t}(x)}{dx} - \frac{d\overleftarrow{t}(x)}{dx} = \frac{1}{v_r} - \left(\frac{1}{v_r}\right),$$

$$\frac{2}{v_r} = \frac{dt_p(x)}{dx} = \frac{\Delta t_p(x)}{\Delta x}$$

или

$$v_r = 2 \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (38)$$

Величина $\vec{t}(x) + \Delta \vec{t}(x)$ зависит от x и представляет собой уравнение разностного годографа. Его строят по точкам x_1, x_2, x_3 и т. д., в которых вычисляют величину $\vec{t}(x) + \Delta \vec{t}(x)$ и т. д. Затем по разностному годографу находят отношение $\Delta x / \Delta t$, которое и позволяет определить граничную скорость v_r . Имеются и другие способы определения величин $v_{эф}$ и v_r .

4. Построение отражающих и преломляющих границ

Существует много способов построения отражающих и преломляющих границ. Для построения границ необходимо иметь сведения о распределении средних и

пластовых скоростей в покрывающей толще, а также данные о временах пробега сейсмических волн. Для построения сейсмических границ применяют ручные и машинные способы. При ручных способах сейсмические границы наносят в виде сплошных линий, соответствующих тем участкам, где волна прослежена непрерывно. На участках, где положение горизонта определено предположительно, его изображают пунктирной линией.

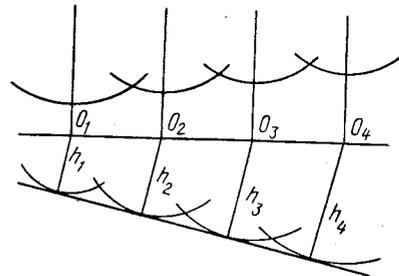


Рис. 127. Определение отражающей границы способом t_0 (e)

Из большого многообразия способов построения сейсмических границ рассмотрим способ нулевого времени (способ t_0). Построение отражающих границ методом t_0 заключается (рис. 127) в нахождении отрезков $h_i = v_{эф}(t_0/2)$. Значение величин h_i находят в точках взрыва O_1, O_2, O_3 . Затем из этих точек проводят полуокружности радиусом h_i , общая касательная к которым дает положение отражающей границы. Величина $v_{эф}$ должна быть известна. Она может быть получена, например, способом встречных годографов. Величина t_0 — это время, зарегистрированное сейсмоприемником у пункта взрыва.

Для нахождения преломляющей границы способом t_0 используют два встречных годографа (см. рис. 126) в пунктах O_1 и O_2 , увязанных во взаимных точках времени T . По ним строят вспомогательную кривую

$$t_0(x) = \vec{t}(x) - [T - \overleftarrow{t}(x)] = \vec{t}(x) - \Delta t(x).$$

Затем в нескольких точках кривой $t_0(x_i)$ находят глубину до преломляющей границы по формуле:

$$h = \frac{v_{эф} t_0(x_i)}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{v_{эф}}{v_r}\right)^2}}, \quad (39)$$

а затем находят среднее значение h .

Как видно, для определения h необходимо знать величины v_r и $v_{эф}$. Первая из них может быть найдена, если известна величина по $t_p(x) = \vec{t}(x) + \Delta t(x)$, или другими способами. Величина $v_{эф}$ находится по результатам сейсмокаротажа или вместо $v_{эф}$ используется значение $v_{эф}$. В случае плоских сейсмических границ $v_{эф} = v_{сп}$.

5. Построение сейсмических разрезов

Для построения сейсмического разреза по результатам нивелирования вычерчивают рельеф дневной поверхности с пунктами взрыва, линию приведения, которая учитывалась при введении поправок за рельеф, и от этой линии откладывают глубины отражающих и преломляющих границ. На разрез наносят линии скважин, литологический состав встреченных скважинами пород.

На сейсмическом разрезе жирными линиями выделяют опорные горизонты, которые четко прослеживаются на большей части или на всех профилях. Сравнивая сейсмические разрезы, по данным бурения определяют стратиграфическое положение опорных горизонтов. Каждому из них присваивают условные обозначения. Если в разрезе отсутствуют опорные горизонты, то строят пунктирными линиями условные горизонты — линии, приблизительно параллельные близко расположенным к ним сейсмическим границам.

Дизъюнктивные нарушения обычно проявляются в виде разрыва и смещения осей синфазности. Для прослеживания линии нарушения сопоставляют поведение соседних осей синфазности на разрезе и стремятся обнаружить закономерность в пространственном распределении участков разрыва.

Анализируя поведение опорных и условных горизонтов на сейсмическом разрезе, линий возможных нарушений совместно с имеющимися геологическими данными, данными гравirazведки и других геофизических методов, проводят предполагаемые наиболее вероятные стратиграфические и литологические контуры.

Располагая данными о плотностях полученных контуров, рассчитывают теоретическую кривую силы тяжести. Сравнивая ее с наблюдаемой, устраняют между ними расхождение. Учитывают результаты магниторазведки и других геофизических методов.

Полученный в результате геологической интерпретации сейсмического разреза и наполненный геологическим содержанием разрез носит название сейсмогеологического разреза.

6. Построение структурных карт и схем

При площадных сейсмических работах результаты представляют в виде сейсмических карт и схем различных сейсмических (опорных или условных) горизонтов. В первую очередь строят

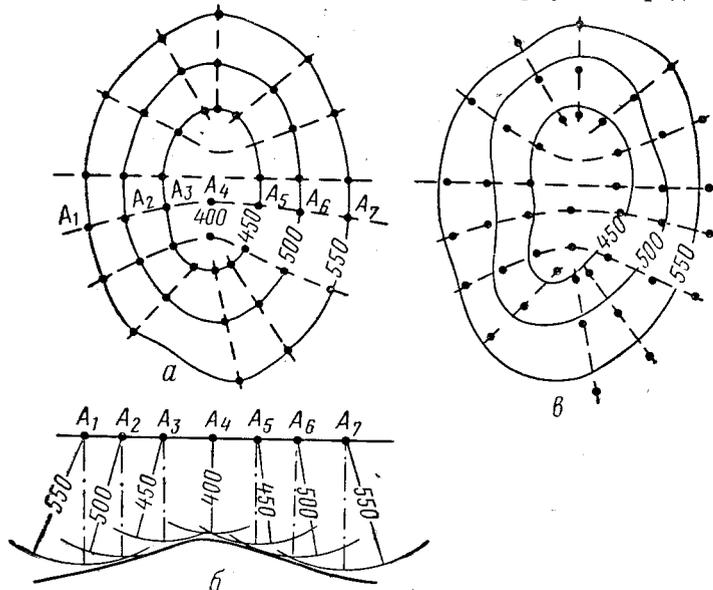


Рис. 128. Составление карт изогипс в метрах.

a — карта изонормалей; *b* — разрез по линии ортогонального профиля; *в* — карта изогипс. Пунктиром показаны ортогональные профили

карту изонормалей (рис. 128, *a*). С этой целью на чертеж наносят линии сейсмических профилей. На каждом из них в точках с наиболее характерными элементами горизонта выносят значения его эхо-глубины (расстояние от точки наблюдения до границы по нормали), которые определяют графически вдоль профилей и по результатам сейсмозондирований. Далее проводят линии равных значений глубин (изонормалей). Сечение изолиний выбирают от 20 до 100 м в зависимости от детальности разведки и углов наклона сейсмического горизонта.

Если сейсмический горизонт залегает с углами наклона не более $3-5^\circ$, то карту изонормалей рассматривают как карту глубин по вертикали, т. е. как карту изогипс. В противном случае, при больших углах залегания горизонта, карту изонормалей перестраивают в карту изогипс.

Один из способов такого перестроения основан на построении так называемых ортогональных профилей. Эти линии, перпендикулярны к изонормалям (подобно тому, как линии тока в электро-разведке по отношению к эквипотенциальным поверхностям). На рис. 128, *b* представлен один из таких профилей. Он пересекает изонормали в точках $A_1, A_2, A_3, \dots, A_7$. Спрямив полученную кривую, проводят из точек полуокружности, радиусы которых равны эхо-глубинам сейсмического горизонта в этих точках. Поскольку ортогональный профиль идет вкост простирания горизонта, то на разрезе его можно определить истинные глубины горизонта по вертикали. Такую же работу проделывают по другим ортогональным профилям. Измеренные глубины по вертикали надписывают около точек A_1, A_2, \dots, A_7 и, соединив их плавными линиями, получают карту изогипс (рис. 128, *в*).

Помимо составления структурных карт, при обработке материалов могут быть составлены карты скоростей прямой (первой преломленной) волны, позволяющие судить о строении верхней части разреза, карты пластовых скоростей по результатам сейсмодатирования или вычисленные по эффективным скоростям, карты граничных скоростей, карты изопакит (изомощности) толщи, залегающей между двумя сейсмическими опорными горизонтами.

По профилям, например, маршрутной съемки составляют графики пластовых и граничных скоростей и др.

7. Обработка сейсмических материалов на аналоговых и цифровых вычислительных машинах

При машинной обработке необходимо знать величину кинематической поправки. Введем понятие о кинематической поправке. Согласно рис. 102, $t_0 = t_{OO'} + t_{O'O}$, а $t = t_{OA} + t_{AB}$, где t_0 — время прихода отраженной волны к сейсмоприемнику у устья взрывной скважины; t — время прихода волны к любому сейсмоприемнику на профиле.

Поскольку падающая и отраженные волны распространяются в среде с одинаковой скоростью v_0 и $OO'O < OAB$, то $t > t_0$. Разница $\Delta t_k = t - t_0$ получила название поправки за удаление сейсмоприемника или кинематической поправки. Величина ее растет по мере удаления сейсмоприемников от пункта взрыва. Если в каждой точке годографа вычесть соответствующую ей поправку Δt_{ki} , то полученный годограф

$$t = t_i - \Delta t_{ki} = t_i - t_i + t_0 = t_0$$

будет иметь вид прямой линии, проходящей через точку t_0 . В случае горизонтальной границы R годограф горизонтален, а при наклонной границе он отражает наклон сейсмической границы R .

Вводя кинематическую поправку Δt_k в наблюдаемые времена, в точках t_i получают время, эквивалентное тому случаю, если бы пункт взрыва находился на вертикали под сейсмоприемником A_i .

Для горизонтальной отражающей границы кинематическая поправка находится следующим образом. Время t прихода отраженной волны в точку, отстоящую на расстоянии x от пункта взрыва, равно $1/v_{cp} \sqrt{4h^2 + x^2}$. Учитывая, что $t_0 = 2h/v_{cp}$ и $h = (t_0/2)v_{cp}$, найдем разницу времен

$$t - t_0 = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{v_{cp}} - t_0 = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{cp}^2}} - t_0.$$

Подкоренное выражение разложим в ряд:

$$\sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{cp}^2}} = t_0 \sqrt{1 + \frac{x^2}{v_{cp}^2 t_0^2}} = t_0 \left(1 + \frac{x^2}{2v_{cp}^2 t_0^2} - \frac{x^4}{8v_{cp}^4 t_0^4} \right)$$

и ограничимся первыми двумя членами ряда:

$$t = t_0 + \frac{x^2}{2v_{cp}^2 t_0}; \quad \Delta t_k = t - t_0 = \frac{x^2}{2v_{cp}^2 t_0}.$$

Величина $\Delta t_k = x^2/2v_{cp}^2 t_0$ и является кинематической поправкой.

Аналоговые машины позволяют вводить статические и кинематические поправки непосредственно в сейсмические трассы и получать исправленное значение t_0 по формуле

$$t_0 = t_i - \Delta t_s - \Delta t_p \pm \Delta t_v - \Delta t_\phi - \Delta t_k(x).$$

В этой формуле выражение $\Delta t_{ct} = \Delta t_s - \Delta t_p \pm \Delta t_v - \Delta t_\phi$ рассматривается как статическая поправка. Таким образом,

$$t_0 = t_i - \Delta t_{ct} - \Delta t_k.$$

Вычисленную заранее статическую поправку учитывают в аналоговых машинах путем сдвига трассы по оси времен относительно момента взрыва на величину, равную времени Δt_{ct} . Если поправка отрицательна, трасса сдвигается в сторону увеличения времени. Величина кинематической поправки меняется в зависимости от величин x и v_{cp} , которые учитываются в аналоговой машине путем изменения масштаба перезаписи каждой отдельной трассы. В аналоговой машине эта операция выполняется автоматически по определенной программе. Программу задают отдельно для каждой трассы.

В аналоговой машине ПСЗ-4 имеется специальный блок ввода поправок, статические поправки вводят вручную. С этой целью

их рассчитывают для каждого канала и с помощью элементов управления цепи задержки устанавливают необходимую задержку.

Кинематическая поправка вводится по определенной программе. Считывающая головка перемещается шаговым двигателем по программе, которая записывается в виде импульсов на отдельной магнитной ленте. Каждый импульс поворачивает считывающую головку на определенный угол, что и позволяет менять временной масштаб записи трассы. Программное устройство ввода кинематических поправок позволяет учесть любой закон изменения средней скорости распространения волн. Сейсмограмма с введенными поправками визуализируется обычно методом переменной плотности. Полученная визуализированная сейсмограмма представляет собой временной разрез, отражающий основные черты глубинного геологического строения.

Применение электронных цифровых вычислительных машин ускоряет обработку сейсмической информации и расширяет ее возможности. На цифровых машинах ведется вычисление поправок, суммирование сигналов трасс по любому желаемому закону и любой программе, количественная интерпретация годографов и временных разрезов. Одной из главных трудностей, мешающих широкому применению ЭВМ, является недостаточный объем их внутренней памяти, в которую иногда не удается поместить всю информацию, подлежащую обработке по единой программе. Это приводит к необходимости комплексовать аналоговые и цифровые вычислительные машины, передавая наиболее простые операции (например, введение статических и кинематических поправок) аналоговой машине, а наиболее сложные (вычисление поправок, эффективных и средних скоростей, определение глубин, составление структурных карт, решение прямой задачи, построение временных разрезов) — цифровой.

Процесс обработки материалов на ЭВМ состоит из трех операций: ввод данных промежуточной магнитной записи в память машины, обработка информации и вывод полученных данных. Имеются устройства, позволяющие вводить в память ЭВМ данные не только цифровых сейсмических станций, но и аналоговую магнитную запись. В последнем случае информация предварительно проходит через кодирующие устройства ввода, в которых аналоговая запись преобразуется в цифровую обычно в двоичном коде. Одновременно с сейсмической информацией в память ЭВМ вводят другие данные (характеристику ЗМС, высоту точек наблюдений местности, глубину зарядов и т.п.), а также программу обработки. Результаты обработки выдаются из машины как в цифровой, так и в аналоговой форме. В цифровом виде выдаются величины скоростей, глубин, поправок, корреляционные и другие функции, полученные в процессе интерпретации. В аналоговом виде на скоростных фоторегистраторах выдается информация в виде временных и сейсмических разрезов, карт изонормалей и структурных сейсмических карт.

Наибольшее применение ЭВМ нашли при обработке материалов методами РНП и ОГТ. В результате обработки сейсмических данных на аналоговых и цифровых вычислительных машинах получают материал, который практически не требует выполнения дополнительных расчетов и пригоден для геологического осмысления.

§ 65. ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Сейсмические методы разведки широко применяются при поисках и изучении месторождений нефти, газа, угля, рудных полезных ископаемых, а также для решения инженерно-геологи-

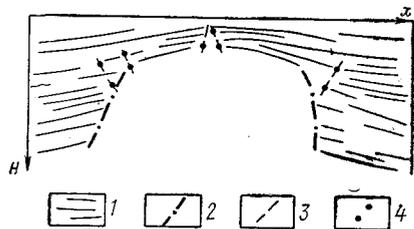


Рис. 129. Сейсмический разрез над соляным куполом.

1 — отражающие горизонты по данным МОВ; 2 — предполагаемые границы соляного купола; 3 — разломы; 4 — точки дифракции

ческих и других задач. При поисках нефти, газа или угля региональные исследования заключаются в изучении закономерностей размещения и строения крупных структурных форм, вмещающих полезные ископаемые. Наблюдения проводятся вдоль отдельных линий профилированием либо зондированием, или сочетанием отдельных профилей и сейсмозондирований. Для каждого профиля предусматривается такая система наблюдений, которая обеспечивает непрерывную корреляцию отраженных или преломленных волн. Для выяснения пространственного расположения сейсмических границ наблюдения проводят как на продольных, так и на непродольных профилях.

Выбор метода при региональных исследованиях зависит от поставленных задач, решаемых в конкретных сейсмогеологических условиях. Обычно для изучения структуры осадочной толщи применяют метод отраженных волн, а для определения рельефа и глубины залегания поверхности кристаллического фундамента — метод преломленных волн.

Региональные сейсмические исследования в нефтегазоносных и угленосных районах часто комплексировать с другими геофизическими методами, особенно с гравirazведкой и магнитотеллурическими методами. Результаты исследований представляют в виде сейсмогеологических разрезов вдоль разведочных линий с элементами пространственного залегания опорных горизонтов.

Пример изучения структуры осадочного чехла в области соляных куполов приведен на рис. 129. По характеру отражающих

горизонтов над куполом обнаруживается антиклинальная структура осадочного чехла. Сам купол отмечен отсутствием отражений.

Поисковые сейсмические исследования проводят для поисков нефтегазоносных или угленосных структур. При поисковых работах наблюдения проводят вдоль отдельных профилей вкрест простирания и по связующим профилям по простиранию структур. Применяют систему продольных профилей в сочетании с короткими непродольными. Последние нужны для уточнения пространственного положения сейсмических границ, а также для взаимной увязки продольных профилей. В сводовых частях нефтегазоносной структуры, в зонах крупных нарушений и на

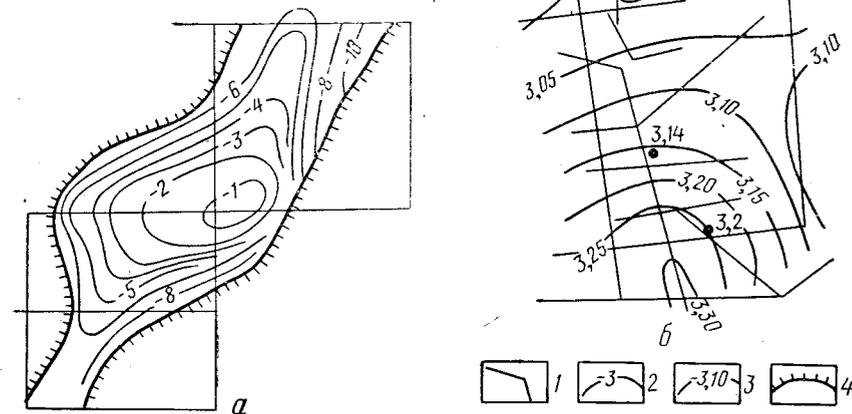


Рис. 130. Структурная схема (а) и карта изменения эффективности скорости (б).

1 — сейсмические профили; 2 — изогипсы опорного горизонта в сотнях метров; 3 — скорость $v_{эф}$ в км/с (точками показана скорость $v_{ср}$ по сейсмокаротажу скважин в км/с); 4 — крутые склоны соляных куполов

других наиболее ответственных участках выполняют непрерывное прослеживание сейсмических границ. В других местах (в области погружения крыльев складки, вдали от свода) наблюдения ведут по более редкой сети профилей. При поисках глубокозалегающих нефтегазоносных структур обычно применяют метод отраженных волн. В сложных геологических условиях (при поисках соляных куполов, рифовых массивов, а также при изучении глубокозалегающих толщ древних платформ) применяют методы ОГТ и РНП. Рельеф неглубоко залегающих структурных форм (до глубины 200—400 м) изучают методом преломленных волн. Результаты поисковых работ представляют в виде разрезов вдоль сейсмических профилей, структурных карт (или схем) по отражающим или преломляющим горизонтам, а также карт изменения эффективных скоростей (рис. 130).

Детальные исследования нефтегазоносных структур ведут по густой сети субпараллельных или радиальных увязанных между собой продольных профилей преимущественно методом отраженных волн по системе непрерывного профилирования. Широко применяют методы ОГТ и РНП, сложные и разнообразные способы обработки, чтобы получить наиболее полную информацию о строении изучаемой структуры. При детальных работах особенно важное значение имеет определение средних или эффективных скоростей. С этой целью выполняют сейсмокаротаж или вертикальное сейсмическое профилирование скважин, определяют эффективные скорости по годографам отраженных волн для всех прослеженных горизонтов. Результаты детальных работ представляют в виде сейсмических разрезов и структурных карт или схем по

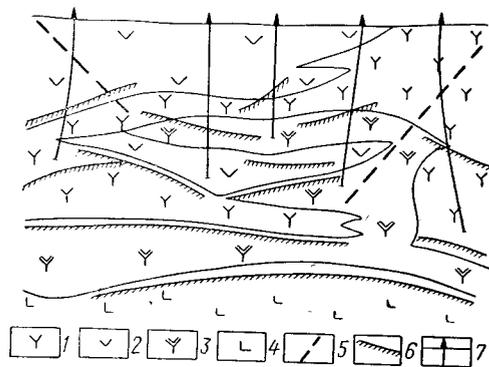


Рис. 131. Сейсмогеологический разрез вулканогенных толщ. 1 — липарито-дациты; 2 — андезит-базальты; 3 — субвулканические липариты; 4 — базальты; 5 — разломы; 6 — отражающие границы; 7 — скважины

одному или нескольким горизонтам, относящимся к изучаемому диапазону глубин.

В рудных районах сейсморазведка применяется для изучения глубинного строения рудоносных структурно-формационных зон, выявления и изучения в их пределах рудоконтролирующих структур и площадей, перспективных в отношении содержания рудных тел. На всех этапах исследования сейсмические наблюдения комплексировуют с гравиразведкой и магниторазведкой. Глубинное строение структурно-формационных зон изучают методом отраженных волн. Определяют мощность и элементы залегания вулканогенных толщ, контактов с интрузиями, выделяют крупные разломы. Работа ведется способом непрерывного профилирования. На рис. 131 показан пример такого рода исследований в пределах Магнитогорского синклиория. Отражающие границы фиксируют контакты липарито-дацитов и андезито-базальтов. По исчезновению отражений (по поглощению волн) картируется крупное субвулканическое тело.

Выявление и изучение рудоконтролирующих структур ведется по системе увязанных разрезов методом отраженных волн в комплексе с гравиразведкой повышенной точности.

Основное внимание уделяют получению отражений на глубинах до 1—2 км. С этой целью применяют методы РНП и ОГТ, в скважинах проводят сейсмокаротаж и вертикальное сейсмическое профилирование, изучают по керну плотность, пористость и акустические свойства горных пород. Это помогает осуществлять привязку отражающих границ.

Методом преломленных волн изучают глубину до поверхности и рельеф кристаллического фундамента, что необходимо для интерпретации данных гравиразведки, а также изменение граничной скорости. Уменьшение граничных скоростей в ряде случаев обусловлено блоками высокопористых гидротермально измененных горных пород, перспективных на размещение рудных залежей.

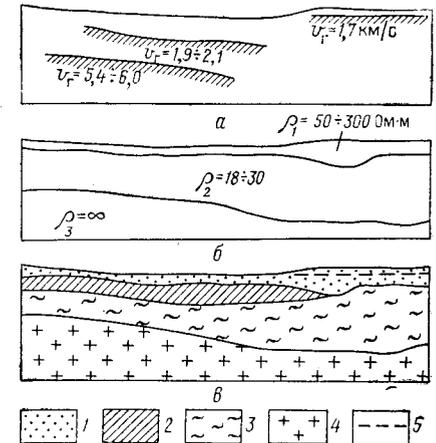


Рис. 132. Геолого-геофизические разрезы долины Днепра. Разрезы: а — сейсмический, б — геологический; 1 — песок; 2 — суглинки; 3 — глина; 4 — гранит; 5 — уровень грунтовых вод

В инженерной сейсморазведке изучают особенности строения верхней части разреза (от 20 до 100 м), поэтому регистрируют преимущественно преломленные и проходящие волны.

В связи с малой глубиной исследований для возбуждения колебаний, помимо взрывов, применяют удары, в том числе горизонтальные (для возбуждения поперечных волн). Для регистрации применяют специальную 6- или 12-канальную аппаратуру. Обычно по первым вступлениям прямой и преломленной волн определяют положение преломляющей границы, граничную скорость. В комплексе с методом преломленных волн часто применяют метод ВЭЗ. Пример комплексирования методов для изучения разреза долины Днепра показан на рис. 132. Поверхность гранитов выделяется высокой граничной скоростью, а также резким увеличением удельного сопротивления, характерного для гранитов. Минимальными значениями граничной скорости выделяется уровень грунтовых вод. Поверхность суглинков совпадает с преломляющей границей, на которой скорость равна 1,7—1,9 км/с.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

В настоящее время для исследования скважин используются следующие геофизические методы:

- 1) электрический каротаж (изучение электрического поля, самопроизвольно возникающего в скважине и около нее, и удельного сопротивления пересеченных скважиной пород);
- 2) радиоактивный каротаж (исследование естественной и искусственной радиоактивности горных пород скважины);
- 3) акустический каротаж (изучение изменения амплитуды и скорости распространения упругих волн в породах);
- 4) магнитный каротаж (измерение магнитной восприимчивости горных пород и составляющих вектора земного магнитного поля в скважине);
- 5) гравитационный каротаж (измерение силы тяжести в скважине).

Кроме того, применяются методы, не имеющие аналогов в наземном варианте: термометрия (измерение теплового поля в скважине), газовый каротаж (непрерывное измерение концентрации и состава горючих газов, выделяющихся при бурении скважины), а также механический каротаж (изучение скорости бурения скважины или продолжительности бурения одного метра породы).

Раньше основной задачей скважинных геофизических исследований было изучение пород, слагающих стенки скважины и находящихся в непосредственной близости от них. Однако в последнее время развивается новое направление — межскважинные исследования, позволяющее использовать скважину для поисков месторождений полезных ископаемых или картирования геологических особенностей пород, расположенных в радиусе до сотен метров от скважины.

Аппаратура и методика выполнения каротажных работ зависят от скважинных условий. Основная особенность каротажной аппаратуры заключается в том, что датчик сигналов и измерительный прибор находятся на большом расстоянии друг от друга. Датчик соединяется с измерительным пультом с помощью кабеля, длина которого может составлять от сотен до тысяч метров. Если на выходе датчика возникают слабые сигналы, то они предварительно усиливаются в скважинном приборе. В связи с этим в нем, кроме датчика, нередко помещаются некоторые элементы элек-

тронной схемы, служащие для питания прибора, предварительного усиления сигналов и других целей. Ограниченный диаметр скважины (от нескольких до первых десятков сантиметров) обуславливает специфическую (цилиндрическую) форму корпуса скважинных приборов, способных выдерживать высокие температуры и большое гидростатическое давление бурового раствора, связанные с большими глубинами.

В скважинах осуществляется контроль за их техническим состоянием (измерение диаметра и элементов искривления скважин), полученные данные используются также для обработки и интерпретации геофизических методов. Геофизические исследования скважин выполняются обычно с помощью комплексных стандартных автоматических каротажных станций.

§ 66. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА СКВАЖИН

1. Каротаж кажущегося сопротивления (КС) и потенциалов собственной поляризации (ПС)

Метод изучения кажущегося электрического сопротивления в скважинах по своей сущности во многом аналогичен электрическому профилированию методом сопротивлений полевой электро-разведки.

Как известно, удельное сопротивление однородной изотропной среды рассчитывается по формуле

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

где K — коэффициент установки (зонда), предназначенной для измерения величины ρ . Удельное электрическое сопротивление горных пород в скважинах определяется с помощью четырех-электродной установки $AMNB$. Электрический ток вводится в породы через питающие электроды A и B , а между приемными электродами M и N измеряется разность потенциалов.

Электроды A , M и N (рис. 133, *a*) или A , B и M (рис. 133, *б*), находящиеся в скважине, составляют зонд КС. Их устанавливают на заранее заданных расстояниях друг от друга и опускают в скважину на кабеле. Четвертый электрод B (при зонде AMN) или N (при зонде BAM) заземляют около устья скважины. Источником питания ИТ-линии AB могут быть сухие батареи, генератор или выпрямитель. Переменное сопротивление R служит для регулировки силы тока, которая измеряется миллиамперметром mA . Последовательно в питающую цепь включают эталонное сопротивление R_0 , о назначении которого сказано ниже. С помощью прибора ИП измеряют разность потенциалов, возникающую между электродами M и N .

Если окружающая зонд среда однородна и изотропна, то величина ρ_k , вычисленная по приведенной выше формуле, соответствует истинному удельному электрическому сопротивлению пород. Практически измерения производят в неоднородной среде, в таких условиях по формуле возможно вычислять кажущееся сопротивление

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

Кажущееся сопротивление среды равно удельному сопротивлению фиктивной однородной среды, в которой измеренная при заданных расстояниях между питающими и приемными электродами A, M, N и токе питания I разность потенциалов ΔU , имеет ту же величину, что и в неоднородной среде. Вели-

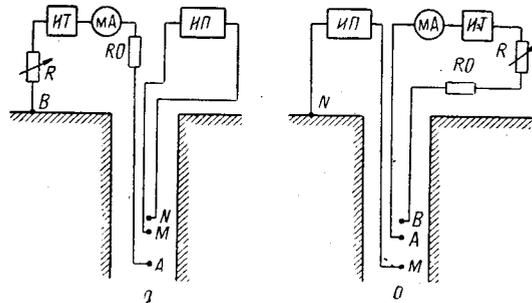


Рис. 133. Принципиальная схема измерения кажущегося сопротивления горных пород в скважине однополюсным (а) и двухполюсным (б) зондами

чина ρ_k в неоднородной среде зависит от истинного удельного сопротивления пластов, их мощностей, размера зонда и других параметров. Кажущееся сопротивление может быть больше или меньше, или равно истинному.

Коэффициент K зависит от расстояний между электродами зонда и определяется по формулам

$$K = \frac{4\pi AM \cdot AN}{MN} \text{ для зонда AMN}$$

или

$$K = \frac{4\pi AM \cdot BM}{AB} \text{ для зонда BAM.}$$

Приемные электроды MN (в зонде AMN) и питающие AB (в зонде BAV) называются парными или одноименными.

В зависимости от соотношения расстояний между парными электродами и непарным различают потенциал-зонды и градиент-зонды. В потенциал-зондах расстояние между парными электродами r_n (MN или AB) значительно больше расстояния r_n между непарным и ближайшим к нему парным электродом. Потенциал-зонды с непарным электродом, удаленным

в бесконечность, называются идеальными. В однородной среде идеальным потенциал-зондом будет зонд, у которого $r_n = 20r_n$. В сложной неоднородной среде расстояние r_n должно превышать мощность пластов и быть тем больше $20r_n$, чем выше их сопротивления. Для них в формуле коэффициента зонда $AN \approx MN$ или $BM = AB$, поэтому коэффициент идеального потенциал-зонда равен

$$K = 4\pi AM = 4\pi L,$$

где $L = AM$ — размер зонда.

В градиент-зондах расстояние между парными электродами r_n значительно меньше расстояния между непарным и одним из парных электродов r_n , т. е. $r_n \ll r_n$. Градиент-зонды, у которых величина r_n бесконечно мала, называются идеальными градиент-зондами. В однородной среде это условие соблюдается при $r_n \leq 0,436h$. В неоднородной слоистой среде величина r_n не должна превышать $0,1h$, и должна быть меньше мощности исследуемых пластов. Для них в формуле коэффициента $AM \approx AN = AO$, где O — точка, расположенная посередине между парными электродами MN , а отношение $\Delta U / MN$ можно рассматривать как напряженность электрического поля E в точке O , поэтому коэффициент идеального градиент-зонда

$$K = 4\pi L^2, \quad \rho_k = K \frac{E}{I},$$

где $L = AO$ — размер зонда.

Согласно принципу взаимности, известному из электроразведки, измеренная величина ρ_k не изменится, если, сохранив расстояние между питающими и измерительными электродами, взаимно заменить их назначение, т. е. пропускать ток через бывшие электроды M и N (на рис. 133, а электроды A и B) и измерять разность потенциалов между бывшими электродами A и B (на рис. 133, б электроды M и N). Из принципа взаимности следует, что и для установки BAV коэффициент идеального градиент-зонда также определяется по формуле

$$K = 4\pi L^2.$$

Различают зонды однополюсные и двухполюсные, последовательные и обращенные. Однополюсный зонд состоит из одного питающего и двух приемных электродов, а двухполюсный — из двух питающих и одного приемного электродов. Если парные электроды зонда расположены ниже непарного, то такой зонд называется последовательным, но если парные электроды находятся выше непарного, то это обращенный зонд.

Кажущееся сопротивление относится к точке O — середине между сближенными электродами. Она называется точкой записи.

Коэффициент идеального градиент-зонда измеряется в квадратных метрах (m^2), а коэффициенты других зондов — в метрах (m).

Преобразуем формулу

$$\rho_k = \frac{E}{\left(\frac{I}{4\pi L^2}\right)}.$$

Выражение $I/4\pi L^2$ равно плотности тока j_0 в однородной и изотропной средах. Поскольку

$$E = j\rho_{MN},$$

где j и ρ_{MN} — соответственно истинные значения плотности тока и сопротивления между электродами M и N , то

$$\rho_k = \left(\frac{j}{j_0}\right) \rho_{MN}.$$

Из формулы видно, что кажущееся сопротивление, измеренное градиент-зондом, пропорционально истинному сопротивлению среды, в которой находятся электроды M , N .

Для кажущегося сопротивления, измеренного потенциал-зондом, в теории электрокаротажа установлено следующее соотношение:

$$\rho_k = \left(\frac{j}{j_0}\right)_{cp} \rho_{M\infty},$$

где $(j/j_0)_{cp}$ — среднее значение отношений плотностей токов, определяемое в основном величинами j/j_0 в породах, расположенных от заземления M (установка AMN) на расстояниях, не превышающих $10L$; $\rho_{M\infty}$ — среднее значение истинного удельного сопротивления среды, находящейся в радиусе, не превышающем $10L$.

Зависимость кажущегося сопротивления от изменения потенциала или напряженности электрического поля определяется следующими соотношениями:

для градиент-зонда

$$\rho_k = \rho_{MN} \left(\frac{E}{E_0}\right) = \rho_{MN} \left(\frac{j}{j_0}\right);$$

для потенциал-зонда

$$\rho_k = \rho_0 \left(\frac{U}{U_0}\right),$$

где ρ_0 — сопротивление однородной среды, в которой находится электрод M (установка AMN); U_0 — потенциал электрода M

в однородной среде; E_0 — напряженность электрического поля в точке O однородной среды при удельном сопротивлении между электродами MN , равном ρ_{MN} .

Таким образом, величина ρ_k , измеренная градиент-зондом, пропорциональна напряженности электрического поля между электродами MN (установка AMN), а величина ρ_k , измеренная потенциал-зондом, пропорциональна потенциалу в точке M .

По аналогии с понятием глубины наземных геофизических исследований в каротаже рассматривают понятие радиуса исследований.

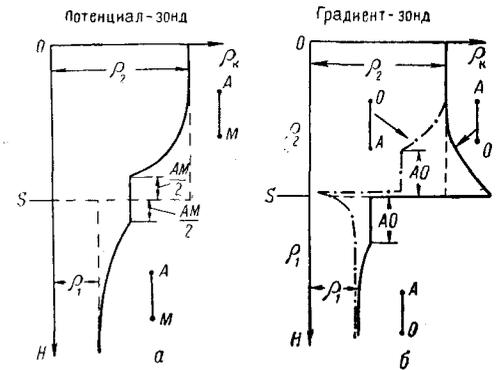


Рис. 134. Изменение величины ρ_k на границе пород различных удельных сопротивлений, измеренных идеальными потенциал-зондом (а) и градиент-зондом (б)

Для разных методов каротажа величина глубины исследований определяется по-разному. В частности, радиус исследования потенциал-зонда равен его двукратной длине $2L$, а градиент-зонда — L .

Рассмотрим теоретические кривые, зарегистрированные идеальными потенциал- и градиент-зондами при пересечении ими горизонтальной границы двух сред S , где $\rho_2 > \rho_1$ (рис. 134).

Когда зонд AM движется в среде с удельным сопротивлением ρ_1 и находится далеко от границы раздела S , то величина ρ_k определяется удельным сопротивлением нижней среды ρ_1 (см. рис. 134, а). По мере приближения установки к породам высокого сопротивления ток, отражаясь от границы S , устремляется в сторону электрода M . Плотность тока на этом участке увеличивается, поэтому растет и величина ρ_k .

При расположении электродов A и M по разные стороны границы S величина ρ_k постоянна и вычисляется по формуле

$$\rho^* = 2 \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}.$$

По мере удаления установки от границы S вверх все меньшая часть тока электрода A втягивается нижней средой, поэтому

потенциал точки M постепенно растет, что ведет к увеличению ρ_k . Когда зонд расположен далеко от границы S , величина ρ_k определяется удельным сопротивлением верхней среды ρ_2 .

Если идеальный градиент-зонд AO удален от границы S вверх или вниз, то величина ρ_k определяется соответственно удельными сопротивлениями ρ_1 или ρ_2 . По мере приближения зонда к границе S сверху электрический ток, втягиваясь нижней средой, устремляется в сторону точки O (т. е. к измерительным электродам M и N). Плотность его в точке O увеличивается и величина ρ_k — возрастает. Это происходит до тех пор, пока точка O не коснется границы S . Когда точки A и O находятся по разные стороны от границы, величина ρ_k постоянная и равна ρ' . После перехода границы S электродом A величина ρ_k постепенно уменьшается от ρ' до ρ_1 .

Несколько иной вид при пересечении границы S имеет кривая, измеренная обращенным градиент-зондом (см. рис. 134, б). Последовательный градиент-зонд более четко отбивает подошву пород высокого сопротивления, а обращенный — кровлю, поэтому первый называют *подошвенным*, второй — *кровельным*.

Необходимо заметить, что данные определения относятся к подошве или кровле пластов, мощность которых в несколько раз превышает размер зонда. При наличии тонкослоистого разреза, мощность пластов в котором меньше L , конфигурация кривых ρ_k отличается от приведенной выше.

Таким образом, по величине ρ_k измеренной потенциал-зондом или градиент-зондом, имеется возможность расчленять горные породы по удельному сопротивлению.

Практически идеальных зондов не существует, а при работе с реальными на измерения ρ_k влияет буровой раствор скважины и зона проникновения его фильтрата. В связи с этим характер теоретических кривых ρ_k несколько видоизменяется, но принципиальные особенности их сохраняются. Это дает возможность по кривым ρ_k метода КС, записанным в скважине, определять границы пластов и их мощности.

Потенциалы собственной поляризации в скважине возникают в результате окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов. Наблюдение естественных потенциалов в скважинах позволяет выделять пористые сухие и водоносные пласты, зоны сульфидной минерализации, угольные пласты, оценивать общую минерализацию подземных вод.

Для измерения разности потенциалов собственной поляризации применяют установку, содержащую два электрода M и N . Обычно электрод M перемещается вдоль скважины на кабеле, а электрод N заземляется около ее устья. Поскольку электрод N неподвижен и потенциал его остается неизменным, то кривую измеренную между электродами M и N можно рассматривать как кривую изменения потенциала электрода M .

Если необходимо более четко выделить границы пластов или снизить влияние сильных блуждающих токов в рудных и угольных скважинах, применяют установку градиента потенциала. Она характеризуется тем, что оба измерительных электрода M и N , составляющих зонд ПС, перемещаются вдоль оси скважины. Точкой записи потенциала служит электрод M , а градиента потенциала — середина между электродами M и N . Измеряемая величина $\Delta U_{\text{ПС}}$ выражается в милливольтках (мВ).

При электрокаротаже применяют схему одновременной регистрации кривых КС и ПС. Принцип ее работы поясним с помощью рис. 135. В этой схеме используют два синхронно работающих преобразователя: токовый $ТП$ и измерительный $ИП$.

В контуре I протекает постоянный электрический ток, величину которого регулируют переменным сопротивлением R и контролируют миллиамперметром $МА$. После прохождения через $ТП$ ток преобразуется в близкий по форме к Π -образным импульсам разной полярности частотой порядка 10—20 Гц.

Таким образом, в контуре II , который замыкается через горные породы, на участке электродов A и B протекает переменный ток. Благодаря этому между измерительными электродами M и N (или M и M')

возникает знакопеременная разность потенциалов $\Delta U_{\text{КС}}$. Одновременно с ней между измерительными электродами возникает постоянная или плавно меняющаяся разность потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$.

Величины $\Delta U_{\text{КС}}$ и $\Delta U_{\text{ПС}}$ регистрируются соответственно I и II каналами измерительной схемы. Каналы могут быть включены последовательно через электрод N (соединения схемы показаны сплошными линиями) или параллельно с помощью двух электродов N и N' (пунктирные соединения схемы на участках ab и aN').

При последовательном соединении в контуре III протекает постоянный ток, обусловленный $\Delta U_{\text{ПС}}$, и переменный ток, возникающий за счет $\Delta U_{\text{КС}}$. Постоянная разность потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$ измеряется регистрирующим прибором $РП$ II канала. Фильтр из дросселя $Др2$ и конденсатора $С2$ защищает этот канал от

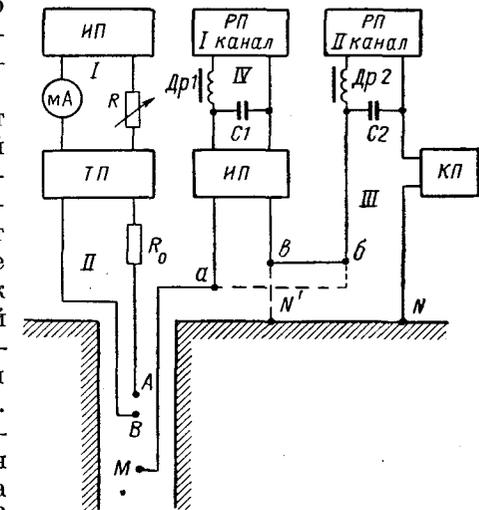


Рис. 135. Принципиальная схема одновременной регистрации кривых КС и ПС

влияния знакопеременной величины $\Delta U_{КС}$. В схеме канала имеется компенсатор поляризации $КП$, необходимый для компенсации фоновой величины $\Delta U_{ПС}$.

Переменная разность потенциалов $\Delta U_{КС}$ после прохождения через измерительный преобразователь $ИП$ превращается в контуре IV в пульсирующую одного знака и измеряется регистрирующим прибором $РП I$ канала. Пульсации выпрямленного тока контура IV сглаживаются фильтром, состоящим из дросселя $Др I$ и конденсатора $С I$.

Если в измерительной схеме применяется компенсационный способ измерений, тогда постоянная величина $\Delta U_{ПС}$ полностью компенсируется в контуре III и не проникает в контур IV . В способе прямой осциллографической регистрации величина $\Delta U_{ПС}$ не компенсируется, поэтому в виде знакопеременной разности потенциалов проходит в контур IV . В этом случае фильтры, стоящие на входе регистрирующего прибора, защищают его от влияния переменной $\Delta U_{ПС}$.

При параллельном соединении измерительные каналы защищаются от влияния знакопеременных величин с помощью специальных фильтров. В этой схеме взаимное влияние каналов значительно ослабляется.

Миллиамперметр $МА$ цепи позволяет лишь грубо установить силу тока в питающей цепи и контролировать ее постоянство в процессе каротажа. Для точного измерения тока в цепи AB , что бывает необходимым в некоторых видах каротажа, последовательно в схему питающей цепи включено эталонное сопротивление R_0 , которое называется шунтом. Оно представляет собой набор сопротивлений величиною от сотых долей до нескольких десятков ом. Разность потенциалов $\Delta U_{ш}$, возникающая на шунте, равна

$$\Delta U_{ш} = I_{AB} R_0,$$

где I_{AB} — сила тока между электродами AB . Следовательно,

$$I_{AB} = \frac{\Delta U_{ш}}{R_0}.$$

Измерив разность потенциалов $\Delta U_{ш}$ регистрирующим прибором, по этой формуле можно с высокой точностью определить величину I_{AB} .

2. Боковое каротажное зондирование

Боковое каротажное зондирование используется для определения удельного сопротивления пластов, встреченных скважиной, и заключается в измерении кажущегося сопротивления комплексом зондов различных размеров.

Кривые $КС$ регистрируются в скважинах некоторого диаметра d_c , заполненных буровым раствором удельного сопротивления ρ_p .

В породах, прилегающих к скважине, часто образуется зона проникновения фильтрата бурового раствора диаметром D , удельное сопротивление которой $\rho_{зп}$. Если сопротивление фильтрата бурового раствора больше удельного сопротивления пластовой воды, то $\rho_{зп}$ будет больше ρ_p . Такой процесс называется **п о в ы ш а ю щ и м п р о н и к н о в е н и е м** бурового раствора. Если буровой раствор более минерализован, чем пластовые воды и $\rho_p < \rho_{зп}$, то $\rho_{зп} < \rho_p$, в этом случае будет **п о н и ж а ю щ е е п р о н и к н о в е н и е** бурового раствора.

В описанных условиях величина ρ_k будет зависеть от соотношения между размерами зонда и диаметрами d_c и D , а также от величин ρ_p , $\rho_{зп}$ и ρ_p .

К настоящему времени теоретически рассчитаны и построены кривые зависимости величины ρ_k от соотношения размеров перечисленных параметров. Они носят название **т е о р е т и ч е с к и х к р и в ы х б о к о в о г о з о н д и р о в а н и я** или **к р и в ы х БКЗ**. Построены они, как и теоретические кривые ВЭЗ, в билогарифмическом масштабе.

Для уменьшения количества кривые построены в виде зависимостей отношений $\rho_k/\rho_p = f(L/d_c)$ для различных величин ρ_p/ρ_p и D/d_c . Кривые БКЗ сведены в палетки, из которых скомплектованы альбомы.

При отсутствии зоны проникновения бурового раствора используют палетки БКЗ-1 (рис. 136). На них шифром (модулем) кривых является отношение $\mu = \rho_p/\rho_p$, т. е. каждая кривая $\rho_k/\rho_p = f(L/d_c)$ построена для определенного постоянного значения μ . На палетках нанесены линии A и B . Линия A соединяет точки кривых БКЗ, для которых выполняется условие $\rho_k = \rho_p$. Линия B соединяет точки кривых, где отношение ρ_k/ρ_p максимально (для $\rho_p > \rho_p$) или минимально (для $\rho_p < \rho_p$). На палетку нанесены линии $L = d_c$ и $\rho_k = \rho_p$, их точку пересечения называют крестом палетки $КП$.

Рассматривая кривые БКЗ-1, можно видеть, что при уменьшении зонда L до размеров, соизмеримых с d_c , величина ρ_k стремится к асимптоте — линии, где $\rho_k = \rho_p$. Следовательно, величина ρ_k , измеренная бесконечно малым зондом, равна удельному сопротивлению бурового раствора.

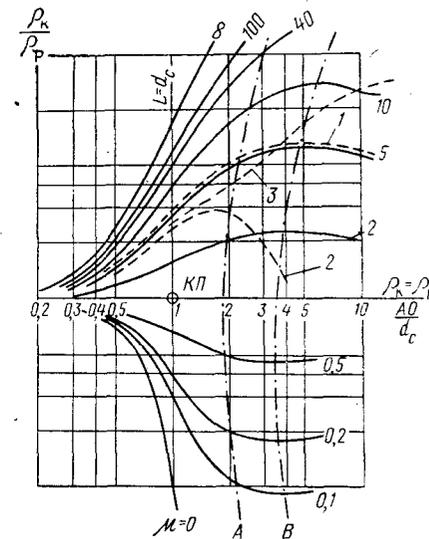


Рис. 136. Палетка кривых бокового электрического зондирования БКЗ-1 для градиент-зонда

При увеличении размеров зонда по отношению к диаметру скважины величина ρ_k стремится к асимптоте — линии, где $\rho_k = \rho_n$. Таким образом, значение ρ_k , измеренное с зондом, во много раз превышающим d_c , будет равно истинному удельному сопротивлению пород ρ_n .

Построены палетки и для случая проникновения бурового раствора при определенных соотношениях D/d_c и $\rho_{зп}/\rho_n$ (рис. 137). Кривые БКЗ отражают характер изменения сопротивления пласта под влиянием проникающего бурового раствора.

Необходимо заметить, что рассмотренные теоретические кривые БКЗ относятся к тому случаю, когда мощность пластов, встреченных скважиной, значительно превышает размер зонда

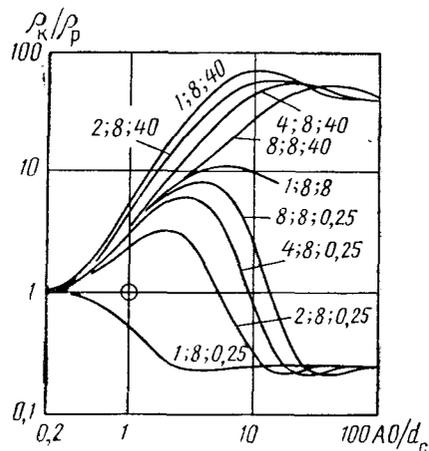


Рис. 137. Сопоставление двухслойных и трехслойных кривых БКЗ для $\rho_n = 40\rho_p$ и $\rho_n = 0,25\rho_p$. Шифр кривых — D/d_c , $\rho_{зп}/\rho_p$ и ρ_n/ρ_p ; трехслойные кривые БКЗ при $\rho_n/\rho_p = 40\rho_p$ соответствуют понижающему, а при $\rho_n = 0,25\rho_p$ — повышающему проникновению раствора

($h \gg L$), а зона проникновения фильтрата бурового раствора образует область, ограниченную цилиндрической поверхностью диаметра D , ось которой совпадает с осью скважины. В действительности нередко бывает, что мощность пластов соизмерима или меньше L , а зона проникновения имеет меняющиеся диаметр D и удельное сопротивление $\rho_{зп}$. В таких условиях характер практических кривых БКЗ будет несколько иной. Для условий пластов конечной мощности рассчитаны и построены палетки типа ПКМ.

Теоретические кривые палеток бокового каротажного зондирования применяются для выбора оптимальных типов и величин зондов для каротажа КС или проведения бокового каротажного зондирования, а также для количественной интерпретации практических кривых БКЗ.

При выполнении БКЗ наиболее часто применяется следующий набор зондов: А8,0М0,1Н; А4,0М0,5Н; А1,0М0,1Н; А0,5М0,1Н; Н0,5М2,5А; А2,5М0,5Н; Н5,0М0,5А; А3,1М0,4Н.

3. Каротаж по методам скользящих контактов (МСК) и электродных потенциалов (МЭП)

В методе скользящих контактов геологические неоднородности среды изучают путем измерения сопротивления R_A заземления, перемещаемого по стенке скважины, или величины тока, проходящего через него, которая находится в обратной зависимости от величины сопротивления заземления R_A .

Заземление выполнено в виде щетки, которая перемещается, скользя по стенке скважины. Форма такого заземления близка к диску радиуса l_3 , а его сопротивление выражается следующей формулой:

$$R_A = \frac{\rho_3}{4l_3},$$

где ρ_3 — эффективное удельное сопротивление среды, зависящее в основном от удельного сопротивления пород скважины.

Под эффективным удельным сопротивлением неоднородной среды подразумевают удельное электрическое сопротивление такой фиктивной среды, в которой сопротивление заземления R_A имеет ту же величину, что и в данной неоднородной среде. В отличие от кажущегося эффективное сопротивление всегда находится в прямой зависимости от удельных электрических сопротивлений сред, слагающих пространство, расположенное вблизи от заземления.

Для выполнения работ методом МСК широко применяется схема, изображенная на рис. 138. В этой схеме электрод B питающей цепи заземлен на поверхности, а щеточный электрод A перемещается на кабеле по скважине. Величину питающего тока от батареи $B1$ регулируют сопротивлением R_T и контролируют миллиамперметром mA .

На эталонном сопротивлении R_0 с помощью регистрирующего прибора $P\Pi$ измеряют разность потенциалов $\Delta U_{ш}$, которая пропорциональна силе тока питающей цепи. С помощью узла схемы, состоящего из батареи $B2$, нагрузочного сопротивления R_H и потенциометра R_K , можно компенсировать фоновое значение измеряемого сигнала и тем самым повышать точность измерений его переменной составляющей. Падение напряжения на шунте равно

$$\Delta U_{ш} = I_{AB} R_0.$$

Сила тока определяется выражением

$$I_{AB} = \frac{E}{\sum R + R_A} = \frac{E}{\sum R + \rho_3/4\pi l_3},$$

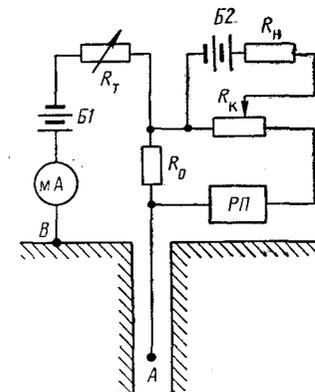


Рис. 138. Принципиальная схема регистрации кривых при использовании метода скользящих контактов

где E — э. д. с. источника тока; ΣR — сумма всех сопротивлений цепи AB , за исключением R_A . Поскольку величины E , ΣR и $4\pi l_3$ для данной установки постоянные, то изменение величины I_{AB} будет зависеть от ρ_3 . При возрастании эффективного сопротивления среды сила тока будет уменьшаться.

Так как размеры щеток малы, то их сопротивление обычно намного превышает сопротивление остальной части цепи. В связи с этим сила тока весьма резко меняется при изменении ρ_3 . Учитывая эту особенность, а также тот факт, что величина R_A в значительной степени зависит от неоднородности среды, расположенной в непосредственной близости от заземления, метод МСК применяется для детального изучения разреза в комплексе с методом КС. С помощью метода МСК выявляют включения рудных минералов высокой электропроводности, определяют более точно их мощность и глубину залегания в разрезе скважин.

Метод электродных потенциалов заключается в выявлении в разрезах скважин горных пород, обладающих электронной проводимостью, путем измерения электродных потенциалов $U_{эп}$, возникающих на поверхности соприкосновения электропроводящего объекта с окружающей средой.

Для измерения электродных потенциалов применяют специальный зонд, состоящий из электрода M , скользящего по стенке скважины, и раздвоенного центрального электрода сравнения. Последний изготавливают из металла, электродный потенциал которого должен отличаться от электродного потенциала изучаемой породы на значительную величину.

Поскольку электропроводящие породы и руды (большинство сульфидов, графит и антрацит) имеют положительные электродные потенциалы, то для более четкой дифференциации разреза электрод сравнения изготавливают из металла с отрицательным значением электродного потенциала (цинк, железо, алюминий и др.). Обычно для этого используется цинк, электродный потенциал которого мало зависит от ионного состава растворов и быстро устанавливается во времени. На поверхности этого металла не образуется защитных пленок, изменяющих величину электродного потенциала.

Сульфидные минералы по возрастанию их электродных потенциалов располагаются в следующем порядке: сфалерит, галенит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, пирит, марказит. В связи с этим при благоприятных условиях имеется возможность не только определить наличие электропроводящих минералов, но и разделить их по разновидностям.

4. Боковой каротаж

Боковой каротаж от обычного метода КС отличается тем, что в зонде, помимо основного питающего электрода, имеются дополнительные экранирующие электроды, которые обеспечивают распространение тока в направлении, перпендикулярном к оси сква-

жины. На результаты измерения таким зондом меньше влияют мощность пласта, сопротивления вмещающих пород и бурового раствора. В этом заключается преимущество метода БК перед обычным методом КС.

В методе бокового каротажа применяют трехэлектродные и семиэлектродные зонды.

Трехэлектродный зонд состоит из центрального электрода A_0 и расположенных симметрично по отношению к нему двух удлиненных экранных электродов A_3 (рис. 139). Потенциалы электродов A_0 и A_3 поддерживаются одинаковыми путем соединения электродов A_3 между собой и подключения к ним электрода A_0 через малое сопротивление (порядка 0,01 Ом) $R_{ш}$. Благодаря такому соединению поверхность зонда представляет собой поверхность равного потенциала, что обеспечивает перпендикулярность к ней токовых линий. Сила тока центрального электрода I_0 при помощи специальной схемы автокомпенсационного устройства поддерживается постоянной, а между электродом A_0 и электродом N измеряется прибором РП разность потенциалов ΔU_{A_0N} .

При постоянной силе тока

$$\rho_{эф} = K \Delta U_{A_0N},$$

где K — коэффициент зонда, он подбирается таким образом, чтобы в однородной среде эффективное сопротивление $\rho_{эф}$ равнялось истинному удельному сопротивлению этой среды.

В семиэлектродном зонде, помимо электродов A_0 и A_3 , установлены симметрично A_0 контрольные электроды M_1N_1 и M_2N_2 , соединенные попарно M_1 с M_2 и N_1 с N_2 . Все электроды в рассматриваемом зонде — точечные. Сила тока через электрод A_0 поддерживается постоянной, а через экранные электроды она устанавливается так, что разность потенциалов между M_1 (M_2) и N_1 (N_2) равняется нулю.

В результате этого ток электрода A_0 фокусируется в пределах тонкого слаборасходящегося слоя и измеряемая величина $\rho_{эф}$ близка к значению удельного сопротивления пластов в широких пределах значений отношения ρ_n/ρ_p . Разность потенциалов ΔU измеряют между одним из контрольных электродов и удаленным электродом N . Величину $\rho_{эф}$ определяют по формуле

$$\rho_{эф} = K_1 \left(\frac{\Delta U}{I_0} \right).$$

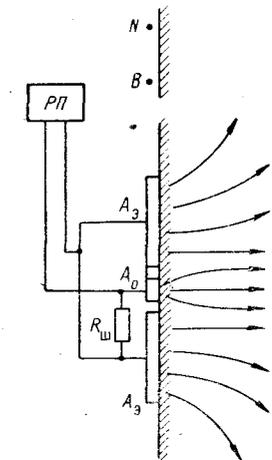


Рис. 139. Схема устройства трехэлектродного зонда бокового каротажа

Поскольку сила тока I_0 стабилизирована, то $K_1/I_0 = K$ и

$$\rho_{\text{эф}} = K \Delta U.$$

Величина K подбирается опытным путем таким же образом, как для трехэлектродного зонда.

Глубина исследования трехэлектродного зонда приблизительно равна трехкратной длине экранирующего электрода. Обычно длина A_3 составляет 1—1,5 м, следовательно, глубина исследования равна 3—4,5 м. Для семиэлектродного зонда глубина исследования несколько меньше.

5. Индукционный каротаж

Индукционный каротаж основан на измерении магнитного поля горных пород, которое образуется при перемещении по скважине генераторной (возбуждающей) катушки G (рис. 140), питаемой переменным током частотой от 10 до 200 кГц. Катушка возбуждает вокруг себя переменное магнитное поле H_1 , под действием которого в окружающих породах возникают круговые (вихревые) токи I_1 . На некотором расстоянии L от генераторной катушки помещается приемная катушка H . Вихревые токи I_1 создают в ней вторичное магнитное поле H_2 , вследствие чего в катушке возникает переменный ток I_2 . Измеряя его величину, можно судить об изменении удельного сопротивления пород стенок скважины, поскольку при частотах 10—200 кГц величина E определяется эффективной удельной проводимостью прилегающих к установке пород.

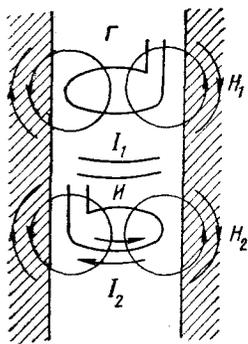


Рис. 140. Принцип работы аппаратуры индукционного каротажа

В приемной катушке э. д. с. индукции состоит из активной E_a и реактивной E_p составляющих. Активная составляющая находится в противофазе с вектором тока I_1 генераторной катушки, реактивная составляющая E_p сдвинута по фазе относительно I_1 на угол 90° .

При каротажных исследованиях регистрируют обычно активную составляющую путем применения фазочувствительных детекторов.

Можно заметить, что на приемную катушку большое влияние оказывает прямое магнитное поле генераторной катушки. Чтобы его скомпенсировать, применяют компенсирующие катушки. Их магнитное поле направлено противоположно полю генераторной катушки, что позволяет свести влияние его к минимуму.

Радиус исследования индукционного каротажа соизмерим с длиной зонда или чуть меньше его.

Преимущество индукционного каротажа перед другими видами электрических исследований заключается в том, что питающие и приемные устройства не требуют непосредственного контакта с буровым раствором или стенкой скважины. Это позволяет применять его в сухих или имеющих непроводящий состав жидкости скважинах, где обычные электрические методы не используются. Недостатком индукционного каротажа является слабая чувствительность к изменениям удельного сопротивления ρ_n высокоомных пластов, начиная с порядка сотен ом-метров, поэтому его применяют в тех случаях, когда ρ_n меньше 100—50 Ом·м.

Он наиболее широко используется при изучении разрезов нефтяных скважин, где четко выделяются тонкие нефтеносные пласты.

6. Резистивиметрия

Под резистивиметрией понимают измерение удельного сопротивления бурового раствора в скважине и на поверхности.

Для измерения удельного сопротивления бурового раствора скважины применяют специальные приборы — резистивиметры. Они обычно состоят из цилиндра с окнами, в которые проникает буровой раствор. В цилиндре на незначительном расстоянии установлены электроды A , M , N . Электрод B заземляется на поверхности около устья скважины. Так как расстояние между электродами очень мало (несколько сантиметров), разность потенциалов ΔU_{MN} определяется в основном удельным сопротивлением бурового раствора. Удельное сопротивление вычисляют по формуле (20).

Для определения коэффициента K резистивиметр эталонируют в баке с известной величиной ρ (в растворе с известной концентрацией соли NaCl).

В лабораторных условиях удельное сопротивление бурового раствора и вообще жидкости измеряют поверхностным резистивиметром. Он состоит из эбонитового сосуда, на внутренних стенках которого установлены питающие электроды AB и приемные электроды MN . Исследуемую жидкость наливают в сосуд, через электроды AB пропускают ток, а между электродами M и N измеряют разность потенциалов. Величину удельного сопротивления вычисляют по формуле (20).

Для определения коэффициента резистивиметра K выполняют эталонировочные измерения, заливая в сосуд жидкость известного удельного сопротивления.

7. Микрондирование

В методах КС и БК, помимо обычных зондов, широко применяются микронды. Они отличаются конструкцией электродов, установленных на небольшом расстоянии (несколько сантиметров) друг от друга на специальном изолирующем основании (башмаке), которое в процессе каротажа прижимается к стенке скважины. Микронд КС состоит из корпуса 1 (рис. 141), на котором на шарнирах 2 установлены три пружинные рессоры 3. Рессоры под действием пружины 4 прижимаются к стенкам скважины. На одной из рессор установлен башмак 5 с электродами A , M , N , к которым

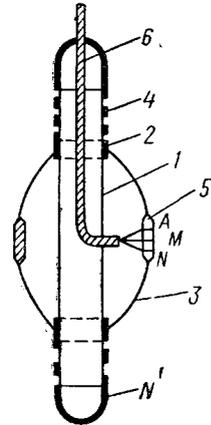


Рис. 141. Схема устройства микронзонда

подключены три жилы кабеля 6. Корпус прибора служит электродом N' . Имеющиеся электроды позволяют составить микроградиент-зонд $A_0,025M_0,025N$ и микропотенциал-зонд $A_0,05M \infty N$.

Микронд бокового каротажа (МБК) состоит из центрального электрода A_0 и расположенного вокруг него экранного электрода A_3 . Электроды A_0 и A_3 имеют один потенциал, поэтому ток от электрода A_0 распространяется по породе в виде узкого пучка в направлении, перпендикулярном к плоскости башмака.

В связи с пониженным влиянием проводимости бурового раствора и малыми размерами микронды КС применяются для детального расчленения разрезов и изучения сопротивления горных пород, непосредственно прилегающих к стенке скважины. Микронды БК

позволяют определять удельное сопротивление промытой зоны, давать точную оценку мощности и пористости пластов, выделять плотные прослои в проницаемых пластах.

§ 67. АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КАРОТАЖА СКВАЖИН

Электрические и другие виды каротажа скважин выполняются с помощью автоматических каротажных станций, состоящих из наземной и скважинной аппаратуры. В станциях имеются постоянные или сменные комплекты скважинных приборов и пультов управления для электрического, радиоактивного и других видов каротажа, а также для выполнения различных операций в скважинах.

Для питания станций используется промышленная сеть или передвижные электростанции, от которых поступает переменный ток частотой 50 Гц и напряжением 110, 220 и 380 В.

Для регистрации измеряемых величин в станциях применяются аналоговая фотозапись с помощью зеркального гальванометра и потенциометрическая на диаграммной ленте, а также запись на магнитную ленту в двоично-цифровом коде.

1. Автоматические каротажные станции с фотозаписью

Принципиальная упрощенная схема работы автоматической каротажной станции (при записи кривой КС) показана на рис. 142. Для питания линии AB в ней применяется электромашинный усилитель ЭМУ, работающий в режиме генератора переменного тока с независимым возбуждением.

Питание на управляющую обмотку ОВ ЭМУ поступает от электронного генератора G . Сопротивление R_C предназначено для стабилизации тока на выходе ЭМУ. В генераторе имеется регулятор для установки оптимального режима стабилизации, с помощью которого устанавливается необходимая величина стабилизированного тока. Синусоидальное напряжение частотой 6—8 Гц через трансформатор $Tr1$ поступает на линию AB . Миллиамперметр MA служит для контроля силы тока, а R_0 — контрольный шунт для точного измерения силы тока в линии AB . Переменное синусоидальное напряжение, возникающее на электродах MN , через разделительную емкость $C1$ (не пропускающую $\Delta U_{ПС}$), делитель напряжения R и фильтр промышленной частоты Φ поступает на первичную обмотку трансформатора $Tr2$. Вторичная обмотка подключена к точкам a и b подвижного контакта $P1-1$ поляризованного реле $P1$. Управляющая обмотка поляризованного реле питается синусоидальным током, который образуется за счет падения напряжения на сопротивлении R_Φ , установленном в линии AB . Благодаря этому подвижной контакт реле $P1-1$ через каждый полупериод изменения синусоидального тока замыкается поочередно то с правым, то с левым контактами a и b . В результате этого через точки z и v схемы в измерительный канал поступает пульсирующий ток одного направления. На входе измерительного канала стоит фильтр низкой частоты для уменьшения

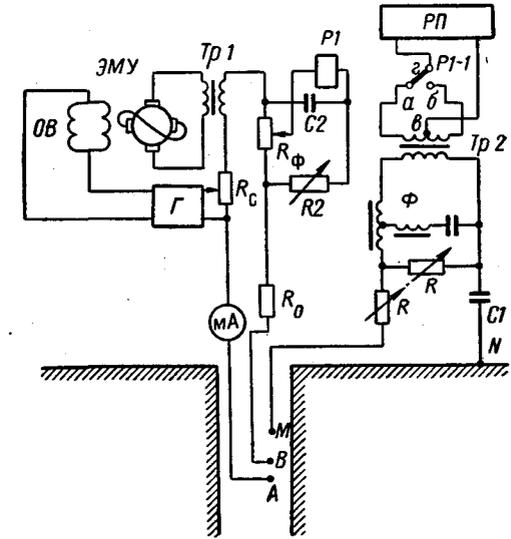


Рис. 142. Принципиальная схема каротажной станции с фотозаписью при регистрации кривой КС

напряжения, возникающего на электродах MN , через разделительную емкость $C1$ (не пропускающую $\Delta U_{ПС}$), делитель напряжения R и фильтр промышленной частоты Φ поступает на первичную обмотку трансформатора $Tr2$. Вторичная обмотка подключена к точкам a и b подвижного контакта $P1-1$ поляризованного реле $P1$. Управляющая обмотка поляризованного реле питается синусоидальным током, который образуется за счет падения напряжения на сопротивлении R_Φ , установленном в линии AB . Благодаря этому подвижной контакт реле $P1-1$ через каждый полупериод изменения синусоидального тока замыкается поочередно то с правым, то с левым контактами a и b . В результате этого через точки z и v схемы в измерительный канал поступает пульсирующий ток одного направления. На входе измерительного канала стоит фильтр низкой частоты для уменьшения

величины пульсации выпрямленного тока. Сигналы записываются регистрирующим прибором *РП*.

Для подстройки фаз переключения реле *Р1* и измеряемого сигнала служит фазовращатель, состоящий из конденсатора *С2* и переменного сопротивления *Р2*. С помощью этого узла схемы устанавливаются такие моменты подключения подвижного контакта к точкам *а* и *б*, в которые меняется знак синусоидального измеряемого напряжения. Делитель напряжения *Р* служит для изменения чувствительности измерительного канала (постоянной по напряжению), т. е. для установки масштаба записи измеряемой разности потенциалов.

Разность потенциалов $\Delta U_{\text{ПС}}$ регистрируется каналом станции ПС. В нем, в отличие от канала КС, отсутствует фазочувствительный выпрямитель и конденсатор *С1*. На входе этого канала установлены фильтры для подавления переменной разности потенциалов $\Delta U_{\text{КС}}$.

В схеме станции имеется градуированный компенсатор поляризации, с помощью которого можно подать в измерительную цепь градуированные величины разности потенциалов. Они дают возможность проверять постоянную по напряжению измерительных каналов (при настройке прибора), устанавливать и контролировать масштаб записи кривой ПС и других параметров на постоянном токе и, наконец, в процессе каротажа смещать (при необходимости) уровень записи на определенную известную величину.

Запись измеряемых параметров ведется с помощью зеркальных гальванометров на фотобумаге. Принцип работы гальванометра такой же, что и гальванометров электроразведочных осциллографов или сейсмического канала. Фотобумага приводится в движение от специального двигателя (обычно сельсина) синхронно с перемещением скважинного прибора.

Автоматическая каротажная станция с фотозаписью АКС-4 позволяет исследовать скважины глубиной 2—3 км; состоит она из лаборатории и подъемника, установленных на двух автомашинах. Лаборатория станции работает на трех- и семижильном кабеле. При использовании семижильного кабеля можно записывать одновременно четыре параметра.

В лабораторию входит фоторегистратор ФР-6, который имеет четыре канала записи. В первых трех каналах установлено по три гальванометра, которые записывают диаграммы в масштабах, относящихся между собой как 1 : 1, 1 : 5 и 1 : 25. В четвертом канале гальванометры регистрируют диаграммы, смещенные относительно друг друга. Этот канал используется для записи $\Delta U_{\text{ПС}}$.

Запись диаграмм ведется на фотоленте шириной 200 мм, которая протягивается в масштабах глубин от 1 : 200 до 1 : 5000. Для облегчения обработки скважинного материала специальные осветители наносят на них через каждые 5 м горизонтальные линии и 30 с вертикальные марки времени, необходимые для

точного контроля за скоростью подъема кабеля. На ленте отмечаются метки глубин.

Электромашинный усилитель станции может работать как в режиме синусоидального, так и постоянного токов. Для питания АВ постоянным током могут применяться батареи.

Одним из недостатков станции АКС-4 является возникающие нарушения работы системы гальванометров фоторегистратора от сильных толчков при переездах и непосредственно на скважине.

В лаборатории станции АКС-7 более позднего выпуска установлен тряскоустойчивый фоторегистратор типа НО13. Станция приспособлена для работы на одно-, трех- и семижильном кабеле в скважинах глубиной до 7 км. Фоторегистратор НО13 при работе с многожильным кабелем может регистрировать одновременно пять параметров или два параметра в двух масштабах глубин. Характерной особенностью лаборатории станции является наличие в ней унифицированного источника питания (УИПК), с помощью которого осуществляется питание всех измерительных электрических цепей блоков и панелей.

Измерительная аппаратура и подъемник станции АКС-1/1,0-3 (СК-1) смонтированы на одной автомашине. Станция предназначена для исследований нефтяных, угольных и рудных скважин глубиной до 2000 м (на одножильном кабеле), до 1500 м (на трехжильном кабеле), до 1000 м (на семижильном кабеле). С ее помощью можно выполнять практически все виды геофизических исследований. На базе серийных каротажных станций с фотозаписью разработана для исследований в труднодоступных районах переносная станция АКСП-65. Она состоит из отдельных блоков весом не более 45 кг и предназначена для исследования скважин глубиной до 4 км на трехжильном кабеле. Станция позволяет выполнять электрический и радиоактивный каротаж, резистивиметрию, термометрию, кавернометрию и инклинометрию, а также измерение с микрзондами.

В станции АКСП-65 для записи измеряемых сигналов применяется трехканальный фоторегистратор НО17. Первые два канала предназначены для регистрации как переменной, так и постоянной составляющих. Они имеют соответственно 3 и 2 гальванометра, каждый последующий из которых записывает кривые в масштабе в пять раз более мелком по сравнению с предыдущим. Третий канал содержит один гальванометр и предназначен для записи кривой ПС. При одновременной регистрации кривых КС и ПС применяется релейный пульсатор, преобразующий постоянный ток в переменный с частотой от 6 до 25 Гц и синхронно выпрямляющий измеряемую разность потенциалов $\Delta U_{\text{КС}}$ перед входом в канал осциллографа. Синхронизация включения контактов релейного пульсатора в токовой и измерительной цепях проводится с помощью электронного генератора соответствующей частоты (от 6 до 25 Гц), от которого питаются обмотки токовых и измерительных реле.

2. Комплексные автоматические каротажные станции с потенциметрической записью

Наиболее широкое распространение среди станций указанного типа получила автоматическая электронная каротажная станция АЭС-900 (1500). Цифры, стоящие в названии, указывают максимальную глубину изучаемых скважин. Станция выпускается в двух вариантах: для глубин 900 и 1500 м и работает на трехжильном кабеле. Такие глубины характерны для скважин рудных и угольных месторождений.

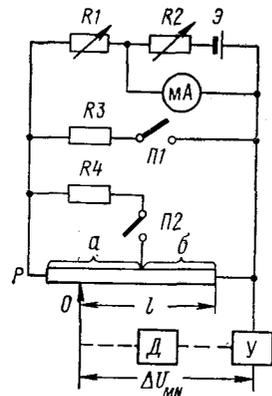


Рис. 143. Принцип работы электронного каротажного потенциметра

Аппаратура станции размещена в кузове одной автомашины: в передней части установлен аппаратный стенд, в задней — спуско-подъемное устройство. Аппаратурный стенд станции состоит из двухканального электронного потенциметра ПАСК-8 (потенциметр автоматический самопишущий каротажный), пульсаторно-токовой панели, панели радиоактивного каротажа и вспомогательных панелей. Схема принципа работы электронного потенциметра изображена на рис. 143. Измерение поступающей на вход разности потенциалов ΔU_{MN} ведется путем сравнения ее с компенсирующей величиной ΔU_k на реохорде P . Компенсирующая разность потенциалов ΔU_k подается на реохорд от элемента \mathcal{E} . Измеряемая разность потенциалов поступает на участок реохорда l , величина которого определяется положением подвижного контакта O . Величины ΔU_k и ΔU_{MN} противоположны по знаку. Величина ΔU_k при перемещении ползунка O по реохорду будет изменяться. При перемещении ползунка вправо ΔU_k уменьшается, при движении ползунка влево ΔU_k увеличивается. Ползунок O перемещается реверсивным двигателем D . Если $\Delta U_k \neq \Delta U_{MN}$, то имеющаяся разность напряжений, пройдя через усилитель $У$, приведет во вращение электродвигатель D . Последний передвигает ползунок O , изменяя тем самым величину ΔU_k до тех пор, пока она не сравняется с измеряемой разностью потенциалов. С ползунком реохорда скреплено перо, которое записывает на движущейся ленте диаграмму изменения величины ΔU_{MN} . Переключатель $П1$ позволяет менять чувствительность реохорда. В замкнутом положении $П1$ параллельно реохорду подключается сопротивление $R3$, следовательно, величина тока компенсации, протекающего через реохорд, уменьшится, это приведет к снижению предела измерения ΔU_{MN} , т. е. к повышению чувствительности измерительного канала в 5 раз.

Плавная регулировка чувствительности осуществляется реостатом $R1$, меняя величину которого, можно изменять величину тока компенсации в цепи реохорда. С помощью переключателя $П2$ дополнительное сопротивление $R4$ может быть подключено к участку реохорда a . Это уменьшает чувствительность участка b примерно в 5 раз по сравнению с чувствительностью участка a , что позволяет записывать на ленте изменение разности потенциалов в большом диапазоне.

В каротажном потенциметре типа ПАСК длина основного a и дополнительного b участков реохорда равна соответственно 8 и 6,4 см. Постоянная по напряжению (чувствительность) реохорда с помощью переключателя $П1$ может быть установлена 2,5 и 12,5 мВ/см, а на участке b реохорда (при замыкании ключа $П2$) — 12,5 и 62,5 мВ/см. Отмеченные величины с помощью реостата $R1$ (реостат «умножить») могут быть уменьшены в 1,1–5 раз. Настройку чувствительности потенциметра выполняют путем изменения тока в контуре с помощью реостата $R2$ («нормализация»).

В потенциметре установлены градуированный и обычный компенсаторы поляризации (ГКП и КП). С помощью ГКП в измерительный канал можно подать градуированные величины разности потенциалов от 0,5 до 499,5 мВ ступенями через 0,5; 5 и 50 мВ.

Запись на лентах ведется с помощью карандашей в масштабах глубин от 1 : 20 до 1 : 5000. Включение измерительных каналов потенциметра может осуществляться по последовательной или параллельной схемам.

3. Аппаратура для регистрации скважинных сигналов в двоично-цифровом коде

Аппаратура для регистрации геофизических сигналов в двоично-цифровом коде дает возможность вводить полученную информацию в ЭВМ с целью ускорения и автоматизации ее обработки.

Аппаратура «Север», предназначенная для скважинных и других исследований, состоит (рис. 144) из усилителей $2a$ – $2g$, аналого-цифрового преобразователя 4 , блока графической записи, шагового накопителя на магнитной ленте 5 и модулятора 6 . Она работает в трех режимах: «регистрация», «передача» и «ввод информации в память ЭВМ».

В режиме «регистрация» сигналы со скважинных датчиков $1a$ – $1g$ поступают на вход усилителей $2a$ – $2g$ и после усиления передаются на вход 4-х канального аналого-цифрового преобразователя 4 . Преобразователь последовательно «опрашивает» выходы усилителей $2a$ – $2g$ и преобразует поступающие с них напряжения в импульсы двоичного восьмиразрядного кода. Полученные импульсы двоичных чисел каждого цикла опроса передаются одновременно на блок графической записи 3 и шаговый накопитель 5 .

В блоке 3 импульсы регистрируются на электрохимической бумаге в виде последовательных точек, образующих графики изменений измеряемых сигналов в процессе каротажа. Бумага протягивается синхронно с перемещением скважинных приборов. В шаговом накопителе импульсы двоичных чисел записываются на магнитной ленте одновременно с синхро-импульсами датчика глубин 10. Путем изменения частоты синхро-импульсов опрос усилителей может осуществляться через определенные интервалы глубин: 1,25; 2,5; 5; 10; 20; 40; 80 и 160 см при максимальной скорости подъема скважинных приборов 5000 м/ч.

Ввод информации в ЭВМ проводится или непосредственно с магнитной ленты шагового накопителя 5 (в режиме «ввод») или через модулятор 6 и канал связи (радио-, телефонный канал или радиорелейная линия) на ЭВМ пункта обработки.

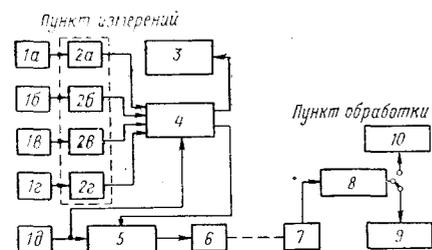


Рис. 144. Блок-схема автоматической каротажной станции с цифровой магнитной записью

На пункте обработки с выхода демодулятора 7 импульсы, двоичных чисел подаются на шаговый накопитель 8, где регистрируются на магнитной ленте. С выхода шагового накопителя импульсы вводятся в блок оперативной памяти 9 ЭВМ для обработки или на блок графической записи 10 для преобразования импульсов в графическую форму для контроля качества принятой информации.

4. Аппаратура комплексного электрического каротажа

Аппаратура комплексного электрического каротажа предназначена для проведения широкого комплекса исследований в скважинах методами КС, ПС, БКЗ и другими методами без подъема скважинного прибора на поверхность. Аппаратура состоит обычно из скважинного прибора и наземных блоков, подключаемых к каротажным станциям.

Основные виды каротажа, выполняемые некоторыми типами аппаратуры, приведены в табл. 12.

Комплексная аппаратура электрического каротажа на семижильном кабеле КЭС-2 предназначена для исследования нефтяных и газовых скважин глубиной до 3500 м.

Основными узлами скважинной части аппаратуры являются многоэлектродный зонд 5 (рис. 145) и переключатель 6. Питание

Наименование вида каротажа	Типы аппаратуры			
	УКА	КСК-1	КЭС-2	АБКТ
КС	+	+	+	+
ПС	+	+	+	+
БКЗ	+	—	+	+
Боковой каротаж	+	—	—	+
Микробоковой каротаж	+	—	—	—
Резистивиметрия	—	—	+	+
Измерения с микрозондами	+	+	—	—
Кавернометрия	+	+	—	—

токового электрода А зондов и резистивиметра осуществляется от низкочастотных источников 1 и 2 через панель управления 3 током частотой 8 Гц по одной из жил кабеля. Электродом В служит броня кабеля.

Переменная разность потенциалов, возникающая между измерительными электродами MN, передается по шести жилам кабеля на панель управления 3, где выпрямляется и регистрируется тремя каналами регистратора (I—III). Величина ПС измеряется между одним из электродов M или N и заземлением на поверхности ЗП и записывается четвертым каналом регистратора (IV).

Полный комплекс измерений аппаратурой КЭС-2 (восемь кривых КС различными зондами, три кривые ПС и кривая резистивиметрии) выполняется за три спуско-подъема. В связи с тем, что кривая ПС записывается при всех спуско-подъемах, ее можно использовать для сопоставления зарегистрированных кривых по глубинам. Переход от измерений одного комплекса к другому осуществляется с помощью скважинного переключателя 6, управляемого с панели управления 3.

В нижней части корпуса скважинного прибора имеется семи-контактный разъем, к которому имеется возможность подсоединить скважинный прибор 7 другого типа, либо каверномер, либо прибор для измерения микрозондами. Переключатель 6 позволяет измерительную схему аппаратуры без подъема на поверхность переключать с выполнения основных трех комплексов на измерения с дополнительно подключенным прибором.

Питание устройства коммутации и переключений в дополнительных скважинных приборах осуществляется напряжением 250 В от унифицированного выпрямителя 4 УВК-2 или УИПК.

Аппаратура комплексного стандартного каротажа КСК-1 на трехжильном бронированном кабеле применяется для исследования нефтяных и газовых скважин глубиной до 7 км. С ее помощью одновременно записывают две кривые КС (с потенциал-зондом А0,5М2,0N и градиент-зондом А2,0М0,5N), кривую ПС и диаметр

При измерении кажущегося сопротивления разность потенциалов с электродов A_3 и N модулируется частотой 14 кГц. Для измерения силы тока I_0 центрального электрода A_0 используется разность потенциалов на эталонном сопротивлении, включенном между электродами A_0 и A_3 . Она поступает на усилитель

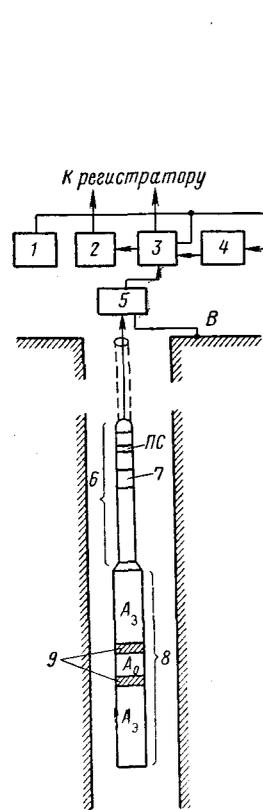


Рис. 147. Принцип устройства АБКТ

тока, с выхода которого в схему модуляции подается два сигнала. Один из них модулируется частотой 25,7 кГц, второй в 10 раз меньше — 7,8 кГц. Благодаря этому образуются точный и грубый каналы измерения. Сигнал, прошедший через логарифмический преобразователь 2, записывается регистратором в виде кривых, пропорциональных $\lg \Delta U_{A_3N}/I_0$.

5. Аппаратура индукционного каротажа и скважинной индукционной электроразведки

Индукционный каротаж выполняют специальной аппаратурой, которая имеется в комплекте каротажных станций.

Аппаратура ПИК-1М (рис. 148) предназначена для работы в скважинах глубиной до 6 км с любым типом каротажного кабеля.

В скважинном приборе, помимо генераторной G и измерительной I катушек, установлены две вспомогательные катушки G_1 и G_2 . Они служат для устранения непосредственной связи между излучающей и приемной цепью и уменьшения влияния скважины, в которой от генератора 2 возбуждается переменное магнитное поле.

Полученный сигнал через усилитель 3 поступает на фазочувствительный детектор 4, где он выпрямляется и поступает в виде постоянного тока на частотно-импульсный модулятор 5. В модуляторе сигнал преобразуется в импульсы с постоянной амплитудой и длительностью, следующие с частотой, пропорциональной кажущейся электропроводности пересекаемых зондом пластов.

Через разделительное устройство 6 импульсный частотно-модулированный сигнал передается по кабелю на измерительную панель 8. Здесь частота следования импульсов преобразуется в постоянный ток, который поступает на регистратор 9 и записывается в виде кривой изменения кажущейся электропроводности пластов.

Для контроля масштаба записи кривой электропроводности служит стандарт-сигнал, создаваемый катушкой СС. Стандарт-сигнал включается электронным ключом 1, который управляется измерительной панелью 8.

Аппаратура питается постоянным током от стабилизированного выпрямителя 7 с регулируемым напряжением на выходе.

Скважинная аппаратура типа АСМИ позволяет измерять три составляющих вектора магнитного поля: одну Z_z , совпадающую с осью скважины, и две другие Z_x и Z_y , перпендикулярные к первой и лежащие соответственно в плоскости, перпендикулярной к плоскости искривления скважины.

Применение сравнительно низких частот генератора (от 125 до 3375 Гц) обеспечивает повышенную глубинность метода и позволяет обнаруживать рудные объекты, лежащие в околоскважинном пространстве, определять их размеры и элементы залегания. Расстояние между генераторной и приемной катушками составляет 25, 50, 75 и 100 м. Аппаратура может работать не только в дипольном (при расположении генератора в скважине), но и в наземном варианте, когда к генератору подключается незаземленная петля, расположенная на поверхности земли. Петлевой вариант позволяет уточнить площадь локализации искомых объектов и облегчить интерпретацию дипольного варианта.

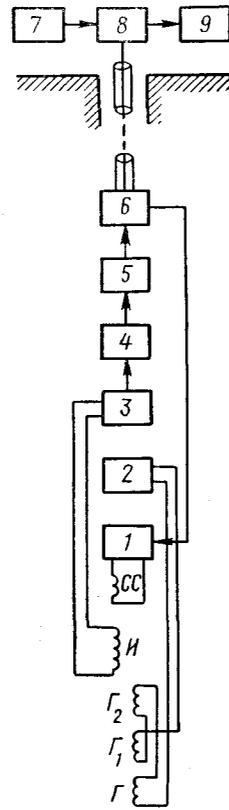


Рис. 148. Блок-схема аппаратуры индукционного каротажа ПИК-1М

6. Спуско-подъемные устройства и оборудование

Для спуска скважинных приборов и зондов в скважину применяются каротажные кабели, которые направляются в нее через блок-баланс и приводятся в движение лебедкой. Каротажный кабель одновременно служит и для электрического соединения схем наземной и скважинной аппаратуры, а также для определения глубины нахождения датчика измеряемых величин.

Каротажный кабель состоит из одной или нескольких токопроводящих жил, которые запрессовываются обычно в резиновую или теплостойкую изоляцию, и защитного покрова из резинового шланга, хлопчатобумажной противогнилостной оплетки или проволоночной брони, предохраняющей кабель от механических повреждений. Жила кабеля состоит обычно из скрученных стальных и медных проволок. Кабели различаются по диаметру, массе (отрезка длиной 1 км), разрывному усилию, типу покрытия, электрическому сопротивлению жилы, и, как следствие действия всех этих параметров, по максимальной глубине исследования скважин.

Кабели обозначаются буквами и цифрами. После первой буквы «К», означающей «Каротажный», следует буква, показывающая количество токоподводящих жил: одна («О»), три («Т»), семь («С»). Третья буква означает наличие хлопчатобумажной оплетки (О), шланга (Ш) или металлической брони (Б). Четвертая буква (если она имеется) характеризует кабели, применяющиеся в специфических, обычно сложных условиях эксплуатации: Н — нефтестойкий, Т — теплостойкий, Ф — фторопластовое покрытие в целях теплостойкости, Д — наличие двойной брони одножильного кабеля. Цифра в обозначении кабеля означает разрывное усилие кабеля в тоннах. Для каротажа глубоких (обычно нефтяных) скважин применяются обычно бронированные кабели с малым диаметром (8—16 мм) и большим разрывным усилием и, при необходимости, имеющие нефтестойкое и теплостойкое покрытие. При каротаже неглубоких (рудных и угольных) скважин применяются кабели в шланге или оплетке с небольшим разрывным усилием.

Каротажные кабели наматываются на барабан лебедки, с помощью которой осуществляется размотка и смотка кабеля и его перемещение по скважине с определенной скоростью. Лебедка для каротажа мелких скважин (100—200 м) состоит из барабана с ручным приводом и храповым устройством, автоматически останавливающим вращение барабана при подъеме кабеля. Лебедки для исследований на больших глубинах имеют более сложную конструкцию. Они имеют привод от коробки отбора мощности автомашины. Имеются рычаги для управления процессом размотки и намотки кабеля, регулирования спуска и подъема, а также автоматический кабелеукладчик. Работой лебедки управляет высококвалифицированный рабочий-лебедчик. Перед ним

расположен пульт ее управления. На пульте имеются приборы, показывающие глубину нахождения скважинного прибора, скорость перемещения кабеля и его натяжение. Каждая лебедка снабжена коллектором, с помощью которого жилы кабеля подключаются к проводам, идущим от аппаратурного стенда станции. В станциях с отдельной установкой аппаратуры и спуско-подъемного механизма лебедка установлена на специальной автомашине подъемника. В подъемнике, как и в лаборатории, установлено переговорное устройство для согласования действий оператора и лебедчика.

На устье скважины в целях преобразования горизонтального перемещения кабеля в вертикальное и центрирования спуска кабеля устанавливается блок-баланс. Он представляет собой ролик, установленный на раме. По вогнутой поверхности ролика перемещается кабель. На щеку ролика устанавливают датчик глубин (сельсин-приемник). Другой сельсин установлен на пульте управления лебедки в счетчике глубин, третий — на оси редуктора двигателя лентопротяжного механизма. Каждый оборот оси ролика блок-баланса вызывает одновременный оборот оси датчика глубин на панели лебедчика, панели контроля каротажа и ведущего вала редуктора лентопротяжного механизма. Диаметр ролика и система шестерен редукторов подобраны таким образом, что счетчики глубин отмечают расстояние перемещения кабеля по скважине в метрах. Для более точной привязки глубины записи с помощью намагничивающего устройства наносят на кабель магнитные метки. Для считывания меток на блок-балансе устанавливают магнитный меткоуловитель. При прохождении магнитной метки через него на ленте регистратора перо делает отброс или гальванометр наносит линию метки. Метки на кабеле устанавливают через 10 м.

К кабелю с помощью стандартных соединительных разъемов (полумуфт) подключаются зонды электрического каротажа или скважинные приборы. При сложных технических условиях скважин (при высоком удельном весе бурового раствора и т. д.) к зондам подсоединяются металлические грузы. Они облегчают спуск кабеля, предохраняют его от скручивания.

§ 68. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ

Перед началом каротажных работ проверяют надежность изоляции электрических цепей, а также исправность токовых, измерительных и вспомогательных цепей станций.

Корпус лаборатории должен быть хорошо изолирован по отношению к силовой, токовой и измерительной цепям, а корпус лебедки — по отношению к контактам коллектора. В случае их ненадежной изоляции кривые каротажа будут искажены утечками тока. Утечки из обмоток силового трансформатора

и питающей цепи создают опасность для работы персонала станции. Утечки в измерительной цепи ведут к уменьшению величины измеряемого сигнала и искажению их формы. Минимально допустимые величины сопротивления изоляций различных цепей станции приводятся в инструкциях по станциям и приборам.

Сопротивление изоляции проверяют с помощью мегометра.

Токовая цепь считается исправной, если в питающую линию АВ поступает ток необходимой величины.

Во время проверки измерительных цепей станций с фотозаписью проверяют работу осветителей, устанавливают нулевое положение бликов гальванометров. Для проверки чувствительности (постоянной по напряжению m) измерительных каналов в них подают калиброванную разность потенциалов ΔU_k от ГКП, высокоточных милливольтметров или шунта. Отклонение пишущего устройства l при этом должно соответствовать отношению $\Delta U_k/m$. Если это соответствие не наблюдается, то путем изменения силы тока в компенсационной цепи (в станциях с потенциометрической записью) или путем регулирования общего сопротивления измерительной цепи (в станциях с фотозаписью) добиваются необходимого отклонения пишущего устройства.

Важным моментом настройки измерительных каналов является проверка возможности установки масштабов записи. Постоянная по напряжению m измерительного канала соответствует масштабу записи кривой ПС.

Масштаб M записи кривых КС определяется формулой

$$M_{КС} = \frac{\rho_k}{l} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \left(\frac{m}{I} \right).$$

Формула показывает, что для установки заданного масштаба $M_{КС}$ можно изменять ток или постоянную по напряжению. В станциях, где сила тока стабилизирована, масштаб записи кривой КС устанавливают путем регулировки постоянной по напряжению. В других станциях измерительный канал подключают к контрольному шунту R_0 , что эквивалентно помещению зонда в среду с известным удельным сопротивлением.

Разность потенциалов ΔU_0 , поступающая с контрольного шунта, равна

$$\Delta U_0 = IR_0 = \frac{M_{КС} I l}{K}.$$

Следовательно,

$$l = \frac{K}{M_{КС}} R_0.$$

Если действительное отклонение пишущего устройства не будет равно вычисленному l по формуле, то его устанавливают путем

плавного изменения тока в питающей цепи или постоянной по напряжению. Отношение $K/M = S$ называется чувствительностью измерительного канала по эквивалентному сопротивлению, оно измеряется в сантиметрах на 1 Ом.

При регистрации тока в методе МСК путем записи сигналов с контрольного шунта масштаб записи тока $M = I/l$. Поскольку $IR_0 = lm$, то необходимое отклонение l устанавливают, изменяя ток или постоянную по напряжению m .

В аппаратуре бокового и индукционного каротажа масштаб записи устанавливают с помощью стандарт-сигнала, эквивалентного известной величине ρ_k .

Подготовка вспомогательных устройств заключается в проверке работы сельсинной передачи, меткоотбивателя, системы привода лебедки, переговорного устройства.

Перед проведением каротажных работ лабораторию и подъемник станции устанавливают на ровной площадке около устья скважины и заземляют. Ось вращения лебедки должна быть перпендикулярна к направлению на скважину. Осуществляют монтаж схемы внешних подключений станции, жил кабеля и заземлений N (B) на поверхности в зависимости от вида предполагаемого каротажа и конструктивных особенностей применяемой станции. Электрический каротаж выполняют при подъеме зонда или скважинного прибора, поэтому вначале его спускают на кабеле. При спуске и подъеме кабеля все его точки, находящиеся в скважине, должны перемещаться с одинаковой скоростью. При резком торможении во время спуска или увеличении скорости подъема может произойти обрыв кабеля. В случае резкого увеличения скорости спуска может возникнуть прихват кабеля в скважине.

Спуск бронированного кабеля, имеющего большой удельный вес, осуществляется со скоростью до 5000—6000 м/ч. Скорость спуска оплетенных и планговых кабелей с небольшим удельным весом, который близок к удельному весу бурового раствора, снижается до 500—200 м/ч.

Скорость регистрации кривых электрокаротажа определяется сложностью геологического разреза, детальностью исследований и техническими возможностями аппаратуры. В общем случае она не должна быть больше максимально допустимой скорости. За максимально допустимую принимается такая скорость, когда расхождения в амплитудах аномалий на кривых, зарегистрированных с этой и в два раза меньшей скоростью против пластов, подлежащих изучению, не превышают допустимых для каждого метода погрешностей измерений.

Масштабы глубин выбирают обычно равными масштабам построения геологических разрезов или крупнее их.

Масштабы регистрации кривых различных видов каротажа подбирают, исходя из требований технической инструкции по каротажу с учетом особенностей и сложности геологического

разреза. Основное стремление при выборе оптимальной величины масштабов выражается в том, чтобы получить возможно наибольшую дифференциацию различных по литологическому составу пластов.

Для контроля стабильности масштаба регистрации кривой ПС перед началом и после каротажа скважины записывают передаваемый с ГРП градуированный сигнал, равный 100 (для масштабов 25 и 50 мВ/2 см), 40 (для масштаба 10 мВ/2 см) и 20 мВ (для масштаба 5 мВ/2 см).

При записи кривых КС и ρ_p в начале и конце регистрации, а также при смене масштаба записи записывают следующие сигналы:

а) положение нулевой линии (при работе с аппаратурой на трехжильном кабеле) или нуль-сигнала (для аппаратуры на одножильном кабеле);

б) отклонение пишущего устройства от контрольного шунта (для аппаратуры на трехжильном кабеле) или стандарт-сигнала (для аппаратуры на одножильном кабеле);

в) положение границы перехода с линейной шкалы на шкалу масштабную (для аппаратуры с потенциметрической записью).

До и после проведения индукционного каротажа скважины при нахождении зонда в воздухе записывают нулевое положение пишущего устройства и его отклонение при одетом на зонд градуировочном кольце и снятом (или стандарт-сигнал). При нахождении зонда в скважине до проведения каротажа записывают положение нуля регистратора и стандарт-сигнал. После выполнения каротажа записывают положение нуля, стандарт-сигнал и отклонение пишущего устройства регистратора против опорного высокоомного пласта ($\rho_k > 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) мощностью более 5 м.

Для контроля качества записи выполняют контрольные повторные записи в интервале не менее 50 м скважины, что позволяет оценить погрешность измерения параметров и погрешность привязки по глубине. При повторных исследованиях скважин допускается расхождение в определении глубин в размере 1—1,5% от глубины скважины.

Каротажные диаграммы, полученные на потенциметре, поступают в обработку непосредственно после записи, диаграммы фоторегистраторов предварительно проявляют. На диаграммах заполняют штамп, в котором указывают наименование организации, выполнявшей каротаж, глубину и диаметр скважины, режимы записи с аппаратурой и другие данные.

На диаграммах с помощью линий меток разбивают шкалу глубин и шкалу масштабов записи.

§ 69. РАДИОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН

1. Сущность радиоактивных методов каротажа

Радиоактивные методы (РК) исследования скважин основаны на регистрации естественного γ -излучения горных пород (метод ГК) или на наблюдении эффектов, возникающих при облучении стенок скважины источниками γ - или нейтронного излучения. При облучении горных пород гамма-квантами в скважине регистрируют следующие эффекты:

а) интенсивность γ -излучения, рассеянного по комптоновскому (метод ГГК-П) или фотоэлектрическому (метод ГГК-С) эффектам;

б) плотность распределения нейтронов, образовавшихся в горных породах в результате фотонейтронного эффекта (метод ГНК или ФНК);

в) интенсивность характеристического рентгеновского излучения (рентгено-радиометрический каротаж).

При облучении горных пород скважины нейтронами регистрируют следующие эффекты:

а) плотность потока медленных (надтепловых) нейтронов (метод ННК-Н);

б) плотность потока тепловых нейтронов (метод ННК-Т);

в) γ -излучение, возникающее при радиационном захвате нейтронов (НГК);

г) γ -излучение радиоактивных изотопов, образовавшихся при облучении горных пород источником нейтронов (каротаж наведенной активности НА).

Методы ГК, ГГК-П и нейтронные могут выполняться в обсаженных скважинах.

Рассмотрим зависимость показаний радиоактивного каротажа от содержания определяемых элементов, не учитывая искажения, связанные с изменением диаметра скважин, скорости перемещения прибора и другими факторами.

В теории гамма-каротажа рассматривают понятие насыщенного пласта. Если гамма-датчик поместить в центре цилиндрического слоя высотой H и толщиной b , то при увеличении этих размеров, в случае постоянного содержания C радиоактивного элемента, интенсивность излучения в модели будет расти за счет γ -квантов, поступающих с дальних ее участков. После достижения некоторых размеров $H = H_n$ и $b = b_n$ дальнейший рост интенсивности I прекратится, потому что γ -кванты дальних участков будут поглощаться моделью.

Радиоактивный слой высотой $H \geq H_n$ и горизонтальной толщиной $b \geq b_n$ называют насыщенным. Интенсивность I_n насыщенного слоя имеет прямую зависимость от содержания в нем радиоактивного элемента:

$$I_n = KC,$$

где K — пересчетный коэффициент, показывающий долю интенсивности γ -излучения, которая обусловлена содержанием единицы концентрации радиоактивного элемента в породе, например, 1% равновесного урана. Величина K зависит от типа счетчика, аппаратуры, диаметра скважины и других факторов. Она определяется путем измерений в модели скважины, где C известно, или непосредственно в скважинах против пластов с известным содержанием C .

В случае ненасыщенного ($h < H_n$) пласта (рис. 149) справедлива формула

$$KC = \frac{S_{ак}}{h},$$

где h — мощность ненасыщенного пласта, см; $S_{ак}$ — площадь аномальной кривой против ненасыщенного пласта, (мР/ч) см.

Таким образом, $C = I_n/K = S_{ак}/Kh$, т. е. измеряя естественное гамма-излучение пород скважины, можно разделить их по радиоактивности и определить содержание в них радиоактивных элементов.

В ядерно-геофизических методах каротажа измерения ведут с применением схем 2 и 3 (см. рис. 90), т. е. наблюдают эффекты многократного рассеяния излучения источников. Источник и датчик перемещаются в скважине на постоянном расстоянии L друг от друга, которое называют размером зонда.

Точку записи относят к середине между ними. Датчик прибора экранируют от влияния прямого излучения источника с помощью стальных и свинцовых (для гамма-излучения) экранов или экранов из парафина или другого вещества с высоким водородосодержанием (для нейтронного излучения).

Метод ГГК-II применяют для расчленения горных пород скважины по плотности и наиболее широко — для выделения угольных пластов или рудных интервалов. Методом ГГК-С определяют содержание элементов с высоким атомным номером (например, для Рb $z = 82$), а фотонейтронным методом — окис бериллия Be_2O . Методом рентгено-радиометрического каротажа устанавливают содержание олова, сурьмы, бария, вольфрама, ртути, свинца и других элементов.

На распределение плотности потока медленных и тепловых нейтронов большое влияние оказывают замедляющие и поглощающие свойства среды. Сильным замедлителем являются водородосодержащие среды. Плотность потока медленных и тепловых нейтронов зависит по-разному от содержания водорода, что определяется расстоянием между источником быстрых нейтронов и датчиком замедленных (медленных или тепловых) нейтронов. На не-

большом расстоянии от источника (15—20 см) плотность замедленных нейтронов растет с увеличением водородосодержания. На расстоянии более 30 см наблюдается обратная картина, поскольку замедленные нейтроны поглощаются средой. Зонд величиной 20—30 см называют инверсионным.

Плотность потока медленных (надтепловых) нейтронов определяется в основном замедляющими свойствами среды, в частности, водородосодержанием. Показания метода уменьшаются по мере роста водородосодержания, если каротаж выполнен заинверсионным зондом. Плотность потока тепловых нейтронов в большей степени зависит от поглощающих свойств пород. Она резко уменьшается в средах, где имеются хлор, бор и другие элементы с высоким сечением захвата.

Гамма-излучение радиационного захвата зависит прежде всего от числа тепловых нейтронов, поглощенных горной породой. Поскольку плотность их определяется замедляющими и поглощающими свойствами среды, то и γ -излучение радиационного захвата зависит от них, в частности, от содержания в среде водорода, хлора, бора. При записи заинверсионным зондом с ростом водородосодержания показания НГК уменьшаются. В широком диапазоне пористости ($k_n = 3 \div 30\%$) интенсивность НГК обратно пропорциональна логарифму водородосодержания. При захвате нейтронов интенсивность γ -излучения радиационного захвата зависит от числа γ -квантов, испускаемых на один захват. При захвате нейтрона ядром хлора испускается большое число γ -квантов, поэтому показания НГК возрастают, а при захвате его ядром бора не происходит γ -излучения, поэтому показания НГК уменьшаются.

На показания приборов при методах ядерно-геофизического каротажа оказывают влияние естественное γ -излучение горных пород, переменный диаметр скважины и искажения, связанные с применением в измерительной схеме интегрирующего контура. Для уменьшения влияния доли естественного γ -излучения мощность источников подбирают таким образом, чтобы искусственное излучение в несколько раз превышало естественное, или его специально измеряют и вычитают из показаний вызванной γ -интенсивности.

Буровой раствор, заполняющий скважину переменного диаметра, поглощая радиоактивное излучение, искажает результаты каротажа. Каверны выделяются на диаграммах ГГК как пласты пониженной плотности или пониженной величины $Z_{эф}$, а на диаграммах ННК как пласты высокого водородосодержания. Меняющаяся эксцентricность датчика относительно оси скважины приводит к искажениям характера каротажных кривых. Чтобы освободиться от влияния скважины, применяют специальные прижимные устройства, с помощью которых гильза прибора приближается к стенке скважины и скользит по ней в процессе каротажа.

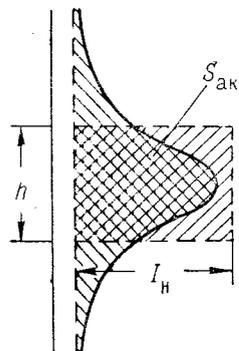


Рис. 149. Аномалия гамма-каротажа

На основе использования управляемого генератора нейтронов возникла модификация импульсного нейтронного каротажа (ИНК). В данном случае породы облучаются кратковременными потоками (импульсами) быстрых нейтронов длительностью T , следующими один за другим через определенные промежутки времени ΔT . Между потоками импульсов проводится измерение плотности тепловых нейтронов (метод ИННК) или γ -излучения радиационного захвата (метод ИНРК). Измерительную установку включают спустя время t после окончания импульса на время Δt . Время t называют временем задержки, а Δt — временным окном.

Последовательно изменяя t при постоянном Δt , можно получить зависимость плотности нейтронов или интенсивности γ -излучения от времени. По ней можно определить среднее время жизни нейтронов в пласте, которое зависит от поглощающих свойств горной породы. При большой минерализации пластовой воды и пористости около 20% среднее время жизни тепловых нейтронов составляет 90—110 мкс в водоносных пластах и 260—300 мкс в нефтеносных. В связи с этим метод ИНК применяется для отбивки водонефтяного контакта в перекрытых обсадной колонной пластах, где обычные способы (НГК, НК-Т, НА) менее чувствительны к содержанию хлора (в растворе NaCl) и не дают положительных результатов.

2. Аппаратура радиоактивного каротажа

Благодаря разнообразию методов радиоактивного каротажа и условий его применения разработано большое число видов аппаратуры, однако принципиальные схемы их имеют несущественные различия.

Примером широко применяемой аппаратуры для нефтяных, газовых, угольных и рудных скважин глубиной до 3500 м может служить двухканальный термостойкий сцинтилляционный радиометр ДРСТ-2 (рис. 150, а). Он предназначен для выполнения широкого комплекса методов РК (ГК, ГГК-П, НГК, НК-Т и НК-Н, НА) с одновременной регистрацией двух параметров на осциллографе или самописце автоматических каротажных станций.

Для регистрации γ -излучения в методе НГК применяется газоразрядный счетчик, для измерения других величин — сцинтилляционные гамма- и нейтронные счетчики. Для работы на больших глубинах, где температура достигает 50—120° С, люминофоры помещают в сосуды Дьюара. В скважинах с температурой окружающей среды до 200° С применяют газоразрядные счетчики, в схеме которых имеется устройство автоматической установки напряжения питания в пределах плато. Счетчик ГК устанавливается в верхней части скважинного прибора, а в нижней — сменные счетчики ГГК, НГК и НК, работающие во втором канале. К нижней части корпуса прибора присоединяется зондовое устройство и камера с источником гамма- или нейтронного

излучения. В методе ГГК применяют изотопы ^{60}Co и ^{137}Cs , а в нейтронных методах Po—Be источник.

Высокое напряжение на счетчики C двух каналов поступает с блока питания БП скважинного прибора. Импульсы естественного и искусственного радиоактивного излучения с выхода счетчиков усиливаются предварительными усилителями $У_1$, что необходимо для срабатывания дискриминаторов $Д$, затем импульсы проходят через дискриминаторы $Д$, усилитель мощности $У_2$ и подаются по кабелю на поверхность земли в измерительную панель. В дискриминаторах подавляются шумовые импульсы, имеющие низкую амплитуду и пропускаются импульсы, вызванные радиоактивным излучением. Усилитель мощности необходим для того, чтобы передать импульс по низкоомному длинному кабелю на поверхность без существенного ослабления. На усилитель мощности импульсы поступают с разной полярностью в правом и в левом каналах. После прохождения через усилитель $У_3$ они поступают в оба канала схемы наземной панели одновременно. Каждый из двух каналов пропускает импульсы одной полярности, в результате чего происходит распределение их по двум каналам. Далее импульсы нормализуются по амплитуде и длительности в нормализаторах $Н$, суммируются на интегрирующих контурах ИК и записываются регистрирующими приборами РП. В схеме наземной аппаратуры имеется калибратор $К$ (генератор импульсов определенной частоты) для установки масштабов записи, а также пересчетный прибор ПС, позволяющий считать импульсы.

Наземная аппаратура подключается к скважинному прибору с помощью трехжильного или одножильного (бронированного) кабеля и состоит из блока питания, панели управления и пересчетного прибора ПС-100 емкостью 100 000 импульсов.

Блок питания подключается к промышленной сети напряжением 220 В и служит для питания скважинного прибора током 250 мА и схемы панели управления. Блок питания подключается к панели управления, которая соединяется с измерительными каналами станции. На панели управления имеются гнезда для включения пересчетного прибора и электронного осциллографа,

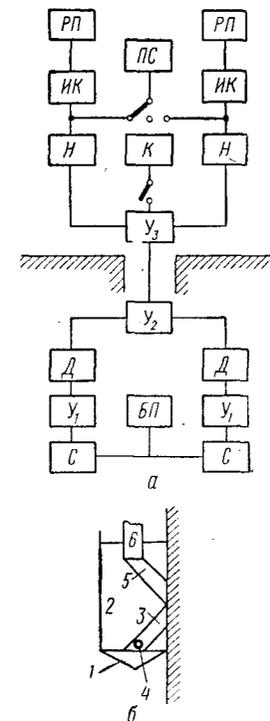


Рис. 150. Блок-схема двухканального каротажного сцинтилляционного радиометра ДРСТ-2 (а) и схема устройства зонда рентгенорадиометрического анализа (б)

переключатели масштабов записи, постоянной времени (от 0,5 до 12 с), частоты импульсов калибратора (от 3000 до 48000 имп/мин) и другие элементы управления.

Селективный гамма-гамма-каротаж выполняют с помощью специального зонда, состоящего из двух камер для источника и датчика γ -излучения. Камеры имеют коллимационные отверстия, прижимаются пружинно-рычажным приспособлением к стенке скважины и скользят по ней в процессе каротажа.

Зонд аппаратуры рентгено-радиометрического каротажа изготовлен по схеме 3, 6 (см. рис. 90), его конструктивные особенности показаны на рис. 150, 6.

В корпусе 1 зонда помещается свинцовый экран 2, где в коллиматоре 3 установлен источник 4, а в коллиматоре 5 люминофор 6 сцинтилляционного счетчика. В процессе каротажа корпус 1 зонда с помощью пружины прижимается к стенке скважины.

Для улучшения условий регистрации мягкого рентгеновского излучения часть корпуса 1 выходов коллиматоров 3 и 5 изготовлена из бериллия. Отделение характеристического излучения от рассеянного γ -излучения выполняется в схеме наземного прибора с помощью дифференциального спектрометра.

Примером легких переносных приборов для гамма-каротажа в скважинах глубиной до 200 м является переносный сцинтилляционный радиометр типа ПРКС-2. Схема его выполнена на полупроводниках и питается от элементов или аккумулятора напряжением 12—15 В. Радиометр состоит из пяти небольших блоков (наземного прибора, самописца, блока питания с преобразователем, счетчика оборотов, ролика блок-баланса) и переносной лебедки с ручным приводом. Блоки в рабочем положении укрепляются на укладочном ящике и его крышке и соединяются специальными проводами. Лентопротяжный механизм через счетчик оборотов редуктора с помощью гибкого валика соединяется с редуктором лебедки. В качестве регистрирующего прибора применяется малогабаритный одноканальный самописец НЗ60 с масштабом глубин 1 : 20, 1 : 50, 1 : 200. Визуальный контроль за изменением интенсивности излучения осуществляется по шкале интенсификатора с пределами измерений от 50 до 10 000 мкР/ч. Эти же пределы имеет самописец НЗ60.

3. Методика радиоактивного каротажа

В методике РК важное значение имеют выбор постоянной времени и скорости перемещения прибора по скважине, влияющих на форму кривых, масштаба записи и размера зонда. При малой скорости счета величина τ должна быть больше, поскольку для получения точного результата необходимо осреднять показания за более длительный промежуток времени. Однако увеличение постоянной времени требует снижения скорости перемещения зонда, чтобы искажения кривой были минимальными. Поэтому

постоянную времени выбирают таким образом, чтобы погрешности за счет флюктуаций не превышали допустимую величину. Практически при скорости счета 500—1000 имп/мин величину τ выбирают равной 25—15 с, а при скорости счета 20 000—25 000 имп/мин — 3—1,5 с.

Допустимая скорость каротажа РК считается такой, при которой за время τ перемещение зонда не превышает при обычных исследованиях 0,6 м, а при детальных исследованиях — 0,3 м.

Выборный масштаб регистрации должен обеспечивать отклонение кривой при переходе от одних пластов к другим не менее чем на 5 см.

Выбор длины зонда определяется необходимостью получения максимальной чувствительности при определении физического параметра или содержания данного элемента.

В методе ГГК-П обычно применяют заинверсионные зонды. В методе ГГК-С для исключения влияния диаметра скважины часто применяют двойной зонд с двумя источниками. Один источник небольшой мощности располагают на расстоянии L около 10 мм, другой — большей мощности — на расстоянии около 90 мм от датчика. Сравнение показаний, полученных двумя зондами, способствует значительному уменьшению влияния скважины.

В методе НК-Т на месторождениях бора каротаж выполняют одновременно инверсионным (15—20 см) и заинверсионным (30—40 см) зондами. Каверны в сухой скважине отмечают минимумом на малом зонде и максимумами на большом. Малым зондом не отмечается заполненная водой часть скважины, а при измерениях большим зондом здесь уменьшается скорость счета. Руды отмечают понижением скорости счета. В методе НК для литологического расчленения разреза применяют зонды большого размера (60—70 см), на показания которых меньше влияет γ -излучение, поступающее из скважины.

В зависимости от условий измерений размер зонда выбирают опытным путем или принимают его равным той величине, которая успешно применялась в других скважинах с аналогичными условиями.

Перед выполнением радиоактивного каротажа собирают (при необходимости) схему измерений, проверяют работоспособность аппаратуры, настраивают дискриминаторы и выполняют эталонирование.

В аппаратуре радиоактивного каротажа имеются интегральные и дифференциальные дискриминаторы. Грубую настройку интегральных дискриминаторов выполняют с помощью источника излучения той минимальной энергии E_0 , которую должен регистрировать прибор. Поднося источник энергии E_0 к датчику прибора и постепенно увеличивая уровень дискриминации, фиксируют такое положение регулятора дискриминации, при котором показания интенсивности излучения начинают резко уменьшаться. Это положение принимают за необходимый уровень дискриминации.

Более точно эта настройка выполняется с помощью электронного осциллографа. К датчику прибора подносится источник излучения энергии E_0 и наблюдается амплитуда его импульсов на экране, затем устанавливается уровень, равный или чуть выше амплитуды этих импульсов.

Дифференциальные дискриминаторы, предназначенные для амплитудного анализа излучения радиоактивных элементов, настраивают также с помощью источников γ -излучения определенных энергий. Настройка дифференциальных дискриминаторов выполняется таким же образом, как и для прибора СП-3. Так, для настройки окна дискриминатора, пропускающего импульсы с энергией E_0 , установив оптимальную ширину окна, выполняют измерения (обычно с пересчетным устройством) при нескольких положениях дискриминаторов нижнего уровня, постепенно увеличивая последний, и строят график показаний в зависимости от уровня. Максимум показаний будет соответствовать положению окна дискриминатора, пропускающего в основном монохроматическое излучение энергии E_0 .

Эталонирование гамма-канала выполняется по той же методике, что и для полевых радиометров, с помощью стандартных эталонов радия. После эталонирования по записи импульсов калибратора определяют чувствительность прибора в импульсах в 1 мин (имп/мин) на 1 мкР/ч.

Показания метода ГГК-II выражают в имп/мин или эталонируют в условных единицах. За условную единицу $J_{\text{эт}}$ принимают разницу между показаниями при помещении скважинного прибора в бак с водой (плотность 1 г/см³) или в алюминиевый блок (плотность 2,65 г/см³) и измерениями с источником и без источника γ -излучения. Показания ГГК-С выражаются в эквивалентах γ -излучения, в процентах содержания исследуемого элемента. Применяют для этой цели модели скважины с известными его содержаниями.

Эталонирование скважинного прибора нейтронного каротажа выполняют в баке с пресной водой. Измерение проводят при установленном источнике нейтронов и без него. Разность показаний, выраженная в имп/мин, представляет условную единицу $J_{\text{эт}}$.

Приборы для фотонейтронного и рентгено-радиометрического каротажа эталонируют на моделях скважины с известным содержанием определяемых элементов.

Перед выполнением каротажа на скважине устанавливают с помощью калибратора масштабы записи и определяют, какой интенсивности S излучения (в имп/мин) соответствует отклонение пишущего устройства при подаче на измерительный канал от ГКП напряжения 1 мВ (цена 1 мВ ГКП).

Для получения кривой РК с масштабом записи n_1 имп/мин на 1 см необходимо, чтобы при подключении калибратора на вход наземной панели отклонение пишущего устройства l было равно $l_1 = v/n_1$, где v — частота импульсов калибратора. Если масштаб

записи n_2 задан в мкР/ч на 1 см или n_3 в условных единицах на 1 см шкалы, то необходимое отклонение пишущего устройства

$$l_2 = \frac{v}{n_2 \varepsilon}, \quad l_3 = \frac{v}{n_3 J_{\text{эт}}},$$

где ε — чувствительность гамма-канала, имп/мин на 1 мкР/ч; $J_{\text{эт}}$ — цена условной единицы.

Необходимое отклонение l устанавливают путем изменения плавной регулировкой чувствительности панели РК. Установленный масштаб можно менять в кратное число раз с помощью переключателя масштабов записи.

Для определения цены 1 мВ ГКП (в имп/мин) записывают отклонение l_4 пишущего устройства под действием некоторой величины ΔU ГКП и определяют величину C по формуле

$$C = \frac{N}{\Delta U_{\text{ГКП}}}.$$

где N — количество имп/мин, которое соответствует отклонению l_4 пишущего устройства.

В процессе каротажа иногда возникает необходимость смещения нулевой линии записи с помощью ГКП. Знание величины C позволяет определить амплитуду смещения (в имп/мин).

Перед выполнением измерений на скважине и после них выполняют следующие контрольные записи: а) положение нулевой линии; б) установку масштаба по калибратору; в) смещение нулевой линии от ГКП при включенном калибраторе при установке масштаба; г) натуральный фон каналов ГК, НГК и ГГК (без источника) при положении прибора на земле; д) контрольную запись в скважине в интервале 50 м или замеры с контрольным эталоном. Для получения контрольного замера в методе ГГК скважинный прибор с источником ставят горизонтально на высоте 2 м от поверхности земли и записывают контрольное показание. В методе НГК скважинный прибор устанавливают горизонтально на высоте 1,5 м и записывают показание J_1 . Затем на расстоянии 1 м выше прибора против середины датчика устанавливают эталонный радиевый источник и выполняют замер J_2 . Разница $J_2 - J_1$ является контрольным показанием. В другом способе гамма-источник устанавливают в специальной насадке, которую надевают на кожух прибора против датчика. Затем выполняют измерения при наличии свинцового экрана (клина между источником и датчиком) и без него. Разницу считают контрольным показанием.

4. Магнитный картаж

Магнитный картаж заключается в измерении магнитной восприимчивости горных пород и руд, слагающих стенки скважины, и составляющих вектора \vec{T} земного магнитного поля.

Результаты картажа магнитной восприимчивости (КМВ) позволяют уточнять глубину залегания и мощность пластов высокомагнитных железных руд в разрезах скважины, вычислять содержание железа в руде, а также помогают при интерпретации данных полевой магниторазведки.

В картаже магнитного поля (КМП) измеряют приращения Z -составляющей и величины трех компонент вектора \vec{T} , что позволяет найти аномальные значения соответственно \bar{Z}_a и \vec{T}_a . По распределению величин \bar{Z}_a или \vec{T}_a имеется возможность обнаруживать залежи магнетитовых руд, расположенных за пределами скважины (в стороне или ниже забоя) на расстоянии до 100 м, и определять элементы их залегания.

Рудная залежь (рис. 151), расположенная в стороне от скважины, обнаруживается по характерной аномалии \bar{Z}_a . Однако данные Z -составляющей не дают возможности определить расположения залежи относительно скважины. По характеру расположения векторов \vec{T}_a определяется наличие рудной залежи, не встреченной скважиной. Анализ пространственного распределения векторов \vec{T}_a позволяет установить азимут залежи относительно оси скважины, ее форму, размеры, основные элементы залегания и расстояние от скважины.

Датчиком скважинных приборов для измерения магнитной восприимчивости служит катушка индуктивности с разомкнутым сердечником, а измерение составляющих магнитного поля ведется с помощью магнитомодуляционных датчиков, работающих по принципу «второй гармоники» (см. § 18).

В комплексной аппаратуре типа ТСМК-40 один скважинный прибор предназначен для поточечного измерения трех компонент-

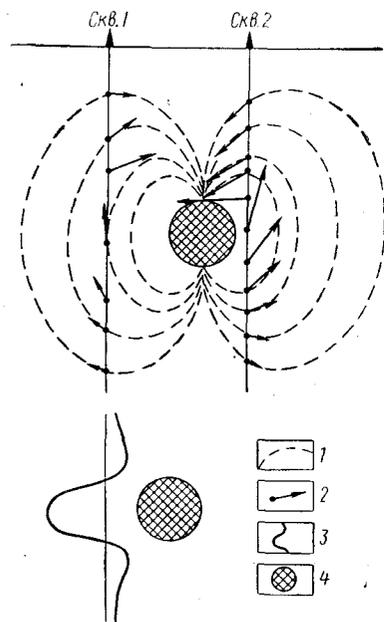


Рис. 151. Кривая Z_a и векторы T_a по скважине.

1 — силовые линии магнитного поля рудной залежи; 2 — векторы T_a ; 3 — график Z_a ; 4 — рудная высокомагнитная залежь

тов магнитного поля, а второй — для одновременного измерения магнитной восприимчивости и Z -составляющей. Наземная панель содержит канал регистрации компонент магнитного поля и канал регистрации магнитной восприимчивости. Измерение магнитного поля ведется до 2,1 Э с погрешностью до 0,1 мЭ. Магнитная восприимчивость регистрируется до 0,5 ед. СГС с погрешностью порядка 2%.

Датчики измерения трех компонент магнитного поля составляют прямоугольную систему координат (рис. 152, а). С помощью отвеса ось z' датчика ориентируется по оси OC скважины,

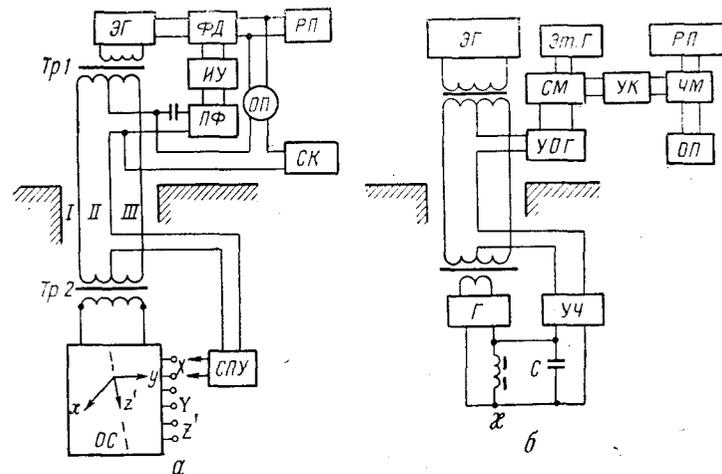


Рис. 152. Блок-схема аппаратуры ТСМК-40.

а — измерение трех компонент магнитного поля; б — измерение магнитной восприимчивости

ось x датчика — в вертикальной плоскости падения скважины перпендикулярно к z' , а ось y датчика — в горизонтальной плоскости перпендикулярно к x .

Обмотки возбуждения датчиков питаются от электронного генератора ЭГ через жилы I—III кабеля и трансформаторы Tr1 и Tr2 током частотой 1000 Гц. Сигналы частотой 2000 Гц, возникающие в измерительной обмотке того или иного датчика (под действием магнитного поля Земли), через скважинное переключающее устройство СПУ, управляемое с поверхности земли, передаются по системе жил кабеля I—III в полосовой фильтр ПФ и избирательный усилитель ИУ. Они пропускают и усиливают сигналы, частота которых равна 2000 Гц. Далее измеряемые сигналы выпрямляются фазовым детектором ФД в постоянный ток, направление которого зависит от фазы пришедшего сигнала, и через отсчетный прибор ОП поступают в обмотку данного датчика с целью автоматической компенсации магнитного поля,

воспринимаемого датчиком. Чем больше будет величина сигнала, тем больше будет ток компенсации, тем большие показания зафиксирует отсчетный прибор ОП. Для расширения пределов измерения в компенсационную цепь включена схема ступенчатой компенсации СК магнитного поля.

Измерение компонент магнитного поля ведется поточечно с основной прибором. С помощью переключающего устройства СПУ к измерительной схеме по определенной программе подключаются последовательно датчики X, Y, Z' и арретирующее устройство. Последнее закрепляет систему датчиков прибора в интервалах перемещения кабеля в неподвижном относительно корпуса прибора состоянии. При подключении второго прибора измерение Z'-составляющей поля ведется непрерывно и записывается на регистраторах каротажных станций.

Датчик измерения магнитной восприимчивости κ (рис. 152, б) совместно с конденсатором С образует резонансный контур, питаемый от генератора Г. При нахождении датчика в воздухе частоту резонансного контура настраивают равной 3,2 кГц. С помощью умножителя частоты УЧ она увеличивается в пять раз, т. е. до 16 кГц. Под действием магнитных пород стенок скважины индуктивность катушки датчика изменяется, благодаря чему изменяется частота резонансного контура. Величина ее пропорциональна магнитной восприимчивости пород. В канале регистрации κ и сигналы, поступающие с умножителя частоты, усиливаются и ограничиваются по амплитуде в схеме усиления-ограничения УОГ и далее поступают на смеситель СМ. Здесь они сравниваются с частотой 16 кГц эталонного генератора ЭтГ. Сигналы, возникающие за счет разности сравниваемых частот, усиливаются и калибруются в усилителе-калибраторе УК. В частотомере ЧМ они преобразуются в пропорциональный разностной частоте постоянный ток, который фиксируется отсчетным прибором ОП и записывается регистратором РП каротажной станции.

При нахождении датчика прибора в воздухе измеряемая частота равна частоте эталонного генератора, разностная частота равна нулю, поэтому регистрирующие приборы дают нулевые показания.

Для проверки работоспособности, градуировки и эталонирования аппаратуры выбирают на поверхности земли в нормальном магнитном поле контрольный пункт КП.

Градуировка датчиков для измерения составляющих земного магнитного поля выполняется с помощью колец Гельмгольца или соленоидов по методике, аналогичной градуированию наземной и аэромагнитной аппаратуры.

На контрольном пункте проверяют установку датчиков. С этой целью корпус скважинного прибора закрепляют на специальной подставке под углом 10—30° к вертикали, затем поворачивают вокруг вертикальной оси до нулевого отсчета по датчику Y. Затем поворачивают прибор на 180° вокруг вертикальной оси

и берут отсчет. Он не должен превышать цену деления (порядка ± 2 мЭ), в противном случае проводят юстировку датчика с помощью установочного груза. Таким же образом проверяют установку датчика X. Третий датчик не юстируется, поскольку он жестко связан с двумя первыми.

На контрольном пункте определяют зависимость составляющих вектора нормального поля \bar{T}_0 от пространственного положения скважинного прибора. С этой целью измеряют составляющие \bar{X}_0 , \bar{Y}_0 и \bar{Z}'_0 при различных азимутах и углах наклона прибора. Результаты изображают в виде графиков азимутальной зависимости (рис. 153) составляющих для разных углов отклонения оси прибора от вертикали. Графики используются при обработке скважинных измерений.

В скважинном приборе для измерения Z'-составляющей проверяют вертикальность оси датчика, выполняя измерения в четырех

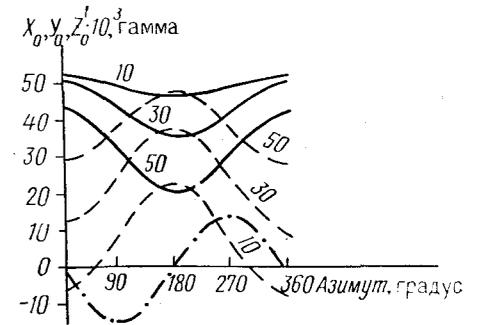


Рис. 153. Графики зависимости составляющих вектора T_0 от пространственного положения скважинного прибора

азимутах через каждые 90°. Расхождения в отсчетах не должны превышать 2 мЭ. Если они больше этой величины, значит ось датчика имеет наклон, который устраняют путем перемещения юстировочных грузов.

Для привязки результатов измерений Z'-составляющей к единственному нормальному полю возле каждой скважины выбирают опорные точки, значение \bar{Z}_a в которые передают с общего контрольного пункта.

Эталонирование аппаратуры КМВ выполняют с помощью нескольких моделей скважины, имеющих различную магнитную восприимчивость. По результатам измерений строят эталонировочный график, по которому показания прибора переводят в единицы СГС.

Измерение магнитного поля выполняют в скважинах с углом наклона от вертикали не менее 3°, что необходимо для уверенной установки датчиков X и Z' в плоскости искривления скважины.

Сначала по скважине ведут измерения магнитной восприимчивости и Z'-составляющей. Перед началом каротажа скважины прибор устанавливают в вертикальном положении, записывают магнитную восприимчивость от контрольного эталона, а также

компенсируют нормальное магнитное поле, выводя пишущее устройство на нулевую линию. Те же операции выполняют после каротажа скважины, но компенсацию нормального поля \bar{Z} не проводят, а записывают положение нулевой линии \bar{Z} -составляющей.

При спуске скважинного прибора наблюдают по отчетному прибору изменение величины магнитной восприимчивости и магнитного поля, что позволяет выбрать масштабы записи κ и \bar{Z}' . Когда скважинный прибор достигает забоя, устанавливают масштабы записи и глубин. Масштабы записи в аномальных интервалах выбирают таким образом, чтобы амплитуда большинства аномалий составляла 0,7—0,8 рабочей ширины ленты. Когда пишущее устройство выходит за пределы ленты, включают более грубый диапазон κ или компенсируют часть магнитного поля, записывая данные интервалы с перекрытием в несколько сантиметров на диаграммной ленте. В нормальном поле запись ведут

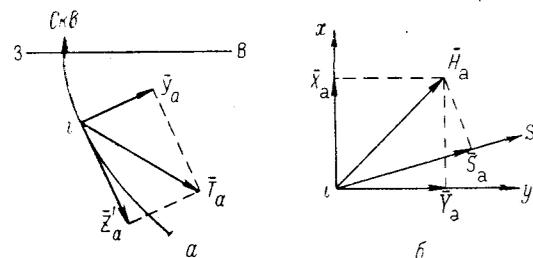


Рис. 154. Построение проекций векторов T_a в плоскости разреза (а) и проекции S_a горизонтальной составляющей на плоскость разреза (б)

при максимальной чувствительности. Скорость каротажа в зависимости от сложности геологического разреза составляет 1000—1500 м/ч.

Трехкомпонентные измерения выполняют в том случае, если по результатам \bar{Z} -составляющих получены аномалии, представляющие поисковое значение. Пользуясь метками кабеля, прибор опускают до необходимой глубины H_i аномального интервала, берут отсчеты \bar{X}_i , \bar{Y}_i , \bar{Z}'_i , затем датчик арретируют и прибор устанавливают на следующей точке интервала. Для оценки качества работ выполняют повторные наблюдения в отдельных наиболее важных точках.

На диаграммах КМВ и \bar{Z} -составляющей наносят нулевые линии путем соединения прямой линией нулевых отсчетов, записанных до и после каротажа скважины. При измерении \bar{Z} -составляющей нулевой линии приписывают значение \bar{Z}_a опорной точки скважины.

По результатам измерений с трехкомпонентным прибором в точке наблюдений получают наблюдаемые значения величин \bar{X}_n , \bar{Y}_n и \bar{Z}'_n .

По результатам инклинометрии находят азимут и угол наклона каждого датчика, а по диаграмме рис. 153 находят нормаль-

ные значения \bar{X}_0 , \bar{Y}_0 и \bar{Z}'_0 в данной точке. Разности $\bar{X}_a = \bar{X}_n - \bar{X}_0$, $\bar{Y}_a = \bar{Y}_n - \bar{Y}_0$, $\bar{Z}'_a = \bar{Z}'_n - \bar{Z}'_0$ равны составляющим вектора \bar{T}_a .

Если азимут геологического разреза совпадает с линией широты A , то по значениям \bar{Z}'_a и \bar{Y}_a можно построить проекции вектора \bar{T}_a на плоскость разреза (рис. 154, а), откладывая в каждой точке i в определенном масштабе векторы \bar{Z}'_a и \bar{Y}_a . При меридиональной ориентировке линии разреза проекции вектора \bar{T}_a строятся по величинам \bar{Z}'_a и \bar{X}_a . Если профиль имеет произвольную ориентировку, то необходимо найти проекцию вектора \bar{T}_a на плоскость S разреза. С этой целью сначала находим горизонтальную составляющую $\bar{H}_a = \bar{X}_a + \bar{Y}_a$, а затем проектируем ее на линию S профиля, как показано на рис. 154, б. По величинам \bar{Z}'_a и \bar{S}_a строят векторы \bar{T}_a в точках скважин профиля.

2. Акустический каротаж

Акустический каротаж заключается в изучении скорости распространения и затухания колебаний ультразвуковой частоты в горных породах, слагающих стенки скважины.

Измерения выполняются с помощью зонда (рис. 155), состоящего из двух источников I_1 и I_2 и приемника $П$ акустических колебаний. Расстояние ΔL между источниками называют базой зонда. Акустические волны от источников падают на стенки скважины в точках O_1 и O_2 под углом полного внутреннего отражения, где образуются преломленные волны. Их первые вступления и амплитуды регистрируются приемником $П$.

Путь пробега волны от источника I_1 до приемника равен I_1O_1OP , а время пробега $t_1 = t_{I_1O_1} + t_{O_1O} + t_{OP}$.

Путь пробега волны от источника I_2 до приемника равен I_2O_2OP , а время пробега $t_2 = t_{I_2O_2} + t_{O_2O_1} + t_{O_1O} + t_{OP}$. Разница времен $t_2 - t_1 = \Delta t$ равна времени пробега на участке O_2O_1 . Таким образом, применение двух источников I_1 и I_2 позволяет исключить из результатов влияние бурового раствора скважины.

Разница Δt характеризует время пробега звуковой волны на участке между двумя источниками. Это дает возможность определить скорость распространения акустических колебаний v на этом участке по формуле

$$v = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1},$$

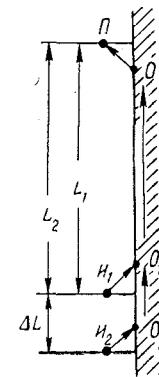


Рис. 155. Принципиальная схема акустического каротажа

где $t_2 - t_1 = \Delta t$ — разность времен первых вступлений колебаний источников I_1 и I_2 , зафиксированных в приемнике $П$.

Если амплитуды колебаний преломленных волн в породах скважины под действием источников I_1 и I_2 равны, соответственно A_1 и A_2 , то логарифм отношения амплитуд A_1/A_2 будет характеризовать затухание акустических колебаний на участке ΔL .

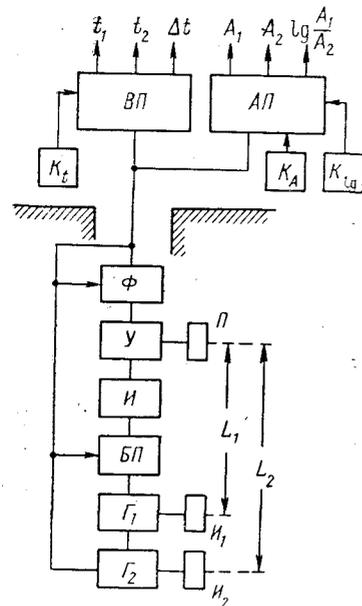


Рис. 156. Блок-схема аппаратуры акустического каротажа

Комплексная аппаратура акустического каротажа (рис. 156) СПАК-2 состоит из скважинного прибора и двух наземных панелей: амплитудной АП и временной ВП. В скважинном приборе установлены два магнитострикционных излучателя I_1 и I_2 импульсов упругих колебаний с частотой 12,5 кГц, управляемых генераторами G_1 и G_2 , а также керамический приемник $П$. Расстояния между приемником и двумя источниками составляют 2,46 и 2,96 м, таким образом, $L_2 - L_1 = 0,5$ м. Питание G_1 и G_2 осуществляется с помощью блока питания БП.

С помощью коммутирующих импульсов, поступающих из схемы временной панели, каждые 40 мс генераторы G_1 и G_2 создают в излучателях I_1 и I_2 импульсы упругих колебаний, сдвинутые между собой на половину периода импульсов. Одновременно с этим коммутирующие импульсы запускают измерительные каналы времен t_1 и t_2 , где t_1 — время прохождения волны

на базе L_1 ; t_2 — время на базе L_2 . Прошедшие через горную породу и буровой раствор колебания воспринимаются керамическим приемником $П$. В нем возникают импульсы, которые предварительно усиливаются и через фильтр $Ф$ поступают на открытый коммутирующим импульсом измерительный канал временной панели ВП и панели амплитуд АП.

Во временной панели импульсы преобразуются в постоянное напряжение, пропорциональное их длительности. Временная панель имеет три выхода, подключаемые к измерительным каналам фоторегистратора. На один из выходов поступает напряжение пропорциональное t_1 , на другой — t_2 , на третий — $\Delta t = t_2 - t_1$.

В панели амплитуд АП из каждого поступающего импульса, пришедшего в канал, «вырезается» часть импульса (подобно тому, как это происходит в аппаратуре МППО).

Полученная серия «вырезанных» импульсов в каждом канале преобразуется в постоянный ток и записывается фоторегистратором. Таким образом, два измерительных канала регистратора, подключенные к временной панели, записывают показания, пропорциональные A_1 и A_2 . Кроме того, в схеме амплитудной панели имеется функциональный преобразователь, с выхода которого на фоторегистратор подается ток, пропорциональный разности $\lg A_1 - \lg A_2$ или $\lg(A_1/A_2)$.

Таким образом, аппаратура СПАК-2 позволяет одновременно регистрировать шесть параметров, характеризующих особенности распространения упругих колебаний в горных породах.

Калибровка каналов (установка масштабов записи) выполняется с помощью калибраторов K_t , K_A и K_{lg} , вырабатывающих серию стандарт-сигналов разной длительности (для t_1 от 325 до 1300, для t_2 — от 400 до 1600, для Δt — от 75 до 300 мс), амплитуды (от 0,4 до 4 через 0,4 В и отношения $\lg(A_1/A_2)$ (от 6 до 24 дБ). Для контроля работы скважинной и наземной аппаратуры в схеме скважинного прибора имеется управляемый с поверхности иммитатор сигналов $И$, который подключается на вход усилителя $У$. Для визуального наблюдения характера импульсов в различных точках схемы прибора в комплекте аппаратуры имеется электронный осциллограф. Корпус скважинного прибора покрыт слоем резины в целях защиты от помех, связанных с ударами прибора о стенки скважины. С помощью обойм с резиновыми стержнями прибор центрируется в скважине. Аппаратура СПАК-2 применяется в комплекте с автоматическими каротажными станциями на трехжильном кабеле с фотозаписью в скважинах глубиной до 5 км. Питание аппаратуры осуществляется от унифицированного каротажного выпрямителя УВК-1, подключенного к промышленной сети. Каротаж выполняется со скоростью до 1000 м/ч.

На основе изучения скорости и амплитуды акустических колебаний создан специальный акустический цементомер АКЦ-1,

с помощью которого изучают качество сцепления цемента с колонной и породой, а также высоту и герметичность цементного кольца. В скважинном приборе имеется источник и приемник излучения. Излучатель работает с частотой 25 кГц. С выхода паземной панели на регистраторы подаются три сигнала, характеризующие затухание амплитуды колебаний в процессе прохождения продольной волны по колонне A_k , по породе или цементному кольцу A_n , а также время t_n прохождения волны по породе (или кольцу) на интервале между источником и приемником. Затухание A_k упругих колебаний вдоль колонны обычно незначительно и резко увеличивается при хорошем сцеплении цемента и колонны. Затухание упругих колебаний в породе A_n характеризует качество сцепления цемента с породой.

3. Геохимические методы исследования скважин

В поровом пространстве горных пород, слагающих разрез газовой, нефтяных и угольных месторождений, содержатся горючие углеводородные газы: метан CH_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , пентан C_5H_{12} , гексан C_6H_{14} . Для месторождений природного газа и каменного угля характерны легкие фракции (метан, этан), а с нефтяными месторождениями связаны в основном тяжелые углеводородные газы (пропан, бутан).

Когда скважина встречает нефтегазоносный или угольный пласты, газы переходят в буровой раствор и увлекаются им на поверхность. Вместе с буровым раствором с забоя скважины извлекается измельченная горная порода — шлам. В шламе разрезов нефтяных месторождений содержатся частицы битуминозных веществ, способных люминесцировать в ультрафиолетовых лучах.

На изучении содержания и состава газов в извлекаемом на поверхность буровом растворе основан газовый каротаж, а на люминесценции битумов шлама — люминесцентно-битуминологический анализ.

Газовый каротаж позволяет выделять нефтеносные и газоносные пласты, оценивать характер их насыщения. На месторождениях ископаемых углей сведения о газоносности необходимы для проектирования сооружений по борьбе с подземным газом шахт.

Люминесцентно-битуминологический анализ шлама позволяет с высокой точностью определить малые содержания нефти (0,01—0,005%) в буровом растворе, а в некоторых случаях распознать по свечению ее состав. Для маслянистой нефти характерны светлые тона люминесценции (желтый, голубой, белый), для нефти с большим количеством асфальтенов и смол — темные тона свечения (коричневое, бурое).

Газовый каротаж и люминесцентно-битуминологический анализ выполняют с помощью автоматической газокаротажной станции АГКС. Газ извлекается из бурового раствора с помощью

дегазатора и в виде газовой смеси поступает в аппаратуру для газового анализа. На станциях типа АГКС в процессе бурения скважины регистрируются следующие параметры:

- а) суммарные и приведенные газопоказания $G_{\text{сум}}$ и $G_{\text{пр}}$, %;
- б) отдельные газопоказания метана C_1 , этана C_2 , пропана C_3 , бутана C_4 , пентана C_5 и гексана C_6^* ;
- в) продолжительность бурения 1 м скважины T_1 , мин/м;
- г) расход бурового раствора на «выходе» скважины $Q_{\text{вых}}$, л/с;
- д) коэффициент разбавления E , м³/м³.

Величина $G_{\text{сум}}$ определяет суммарное содержание углеводородных газов в газовой смеси, полученной при непрерывной дегазации бурового раствора, вышедшего из скважины. По величине $G_{\text{сум}}$ определяют газонасыщенность q см³/л бурового раствора, т. е. объем газов, содержащихся в 1 л бурового раствора:

$$q = K_d G_{\text{сум}},$$

где K_d — коэффициент дегазации дегазатора, равный отношению содержания газа в буровом растворе (в см³/л) к содержанию газа (в %) в анализируемой газовой смеси.

Приведенные газопоказания $G_{\text{пр}}$ (10⁻³ м³/м³) определяются по формуле

$$G_{\text{пр}} = K_d G_{\text{сум}} E,$$

где E — коэффициент разбавления, показывающий, какой объем бурового раствора, прокачанного через скважину, приходится на единицу выбуренного объема породы.

Величина $G_{\text{пр}}$ не зависит от условий бурения, в частности, от объемной скорости бурового раствора, и поэтому непосредственно характеризует газо- или нефтенасыщенность пластов.

Процесс измерения величины T_1 , обратной скорости проходки скважины, называют механическим каротажом. Данные его позволяют судить о степени твердости и цементированности горных пород.

Расход бурового раствора $Q_{\text{вых}}$ представляет собой объемную скорость (в л/с) бурового раствора, выходящего из скважины. По величине $Q_{\text{вых}}$ можно определить интервалы поглощения бурового раствора.

Количество бурового раствора, вышедшего из скважины за время бурения некоторого интервала L равно

$$A = Q_{\text{вых}} T_1 L.$$

* В газовом каротаже принято упрощенное обозначение углеводородных газов по числу n атомов углерода $C(C_n)$.

Объем выбуренной горной породы на этом интервале составляет $(\pi d^2/4)L$, где d — диаметр скважины. Следовательно,

$$E = \frac{Q_{\text{вых}} T_1 L}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) L} = 0,77 \cdot 10^3 \frac{Q_{\text{вых}} T_1}{d^2}.$$

Схема работы газокаротажной станции изображена на рис. 157, а. В процессе бурения скважины насосом 1 в трубы 2 закачивают буровой раствор, который, дойдя до забоя, поднимается по затрубному пространству 3 на поверхность и увлекает за собой твердые частицы 5 выбуренной породы. В буровой раствор из

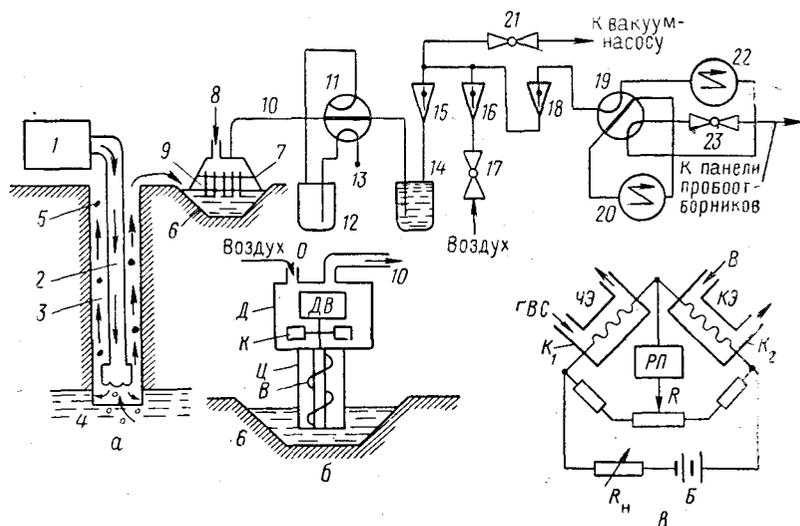


Рис. 157. Принципиальная схема аппаратуры газового каротажа (а), устройство шнекового дегазатора (б) и схема термохимического газоанализатора (в)

пласта 4 переходит газ. Выйдя на поверхность, буровой раствор по желобу 6 течет в специальный бункер.

Чтобы извлечь газ из бурового раствора, в желобе 6 установлен дегазатор поплавкового или шнекового типа. В первом из них корпус 7 плавает в буровом растворе на пенопластовых поплавках. В верхней части корпуса имеются отверстия 8 для поступления воздуха, а внутри корпуса — металлические перегородки 9. Буровой раствор, ударившись о них, образует облако мелких частичек.

В шнековом дегазаторе (рис. 157, б) часть бурового раствора с помощью винта В цилиндра Ц поднимается в дегазационную камеру Д. В ней вращается крыльчатка К, разбрызгивающая буровой раствор мелкими частицами. Через отверстие О в камеру

поступает воздух. Благодаря пониженному давлению в камере Д смешанный с воздухом газ направляется в газовоздушную линию 10. Количество извлеченного газа можно регулировать, изменяя скорость оборотов винта В.

К дегазатору подключена газовоздушная линия, в которой с помощью вакуум-насоса создается пониженное давление. Благодаря этому газ извлекается из частичек бурового раствора, смешивается с воздухом и устремляется по газовоздушной линии 10.

Газовоздушная смесь из дегазатора поступает на распределительный кран 11, откуда при малых концентрациях сероводорода она попадает на барботер 14 с водой. Здесь она очищается от сероводорода и механических примесей, слегка увлажняется и поступает на ротаметр 15. Если в газовоздушной смеси содержится большое количество сероводорода, ее предварительно пропускают через барботер 12 с 50%-ным раствором щелочи (КОН). Щелочь поглощает сероводород и углекислый газ, наличие которых отрицательно сказывается на каталитических свойствах чувствительного элемента газоанализатора. С помощью крана 11 можно прекратить поступление газовой смеси в газоанализатор станции и соединить его через штуцер 13 с атмосферой. Это необходимо при установке нулевых показаний газоанализатора.

Ротаметры 15 и 18 служат для измерения объемной скорости газовой смеси. Они состоят из стеклянной трубки с шариком из легкого материала. Через трубку проходит смесь, и, в зависимости от ее скорости, шарик поднимается на определенную высоту. Скорость (в л/мин) отсчитывается по шкале делений, нанесенной на трубку. В станции АКГС для нормальной работы газоанализатора скорость газовой смеси поддерживается равной 500 л/мин. При наличии высоких концентраций газа возникает опасность нарушения работы чувствительного элемента газоанализатора. Чтобы этого избежать, газовоздушную смесь разбавляют воздухом через вентиль 17.

Объемная скорость поступающего воздуха измеряется ротаметром 16. Чтобы она оставалась равной 500 л/мин, излишнее количество газовой смеси из дегазатора отводится через вентиль 21 и вакуум-насос в атмосферу. Необходимая скорость смеси, поступающей в газоанализатор, контролируется по ротаметру 18.

Из ротаметра газовоздушная смесь поступает на распределительный кран 19. С его помощью смесь пропускается через один из чувствительных элементов 20 или 22, или через вентиль 23 к панели пробоборников.

Суммарное содержание углеводородных газов $\Gamma_{\text{сум}}$ в газовой смеси определяется термохимическим газоанализатором. Он представляет собой (рис. 157, в) мост постоянного тока, где одно плечо — чувствительный элемент ЧЭ рабочей камеры K_1 , а второе — компенсационный элемент КЭ камеры K_2 . Элементы ЧЭ и КЭ изготовлены из вольфрамовой позолоченной нити. Через

камеру K_1 пропускается газовоздушная смесь $ГВС$, а через камеру K_2 чистый воздух $В$. Мост питается постоянным током от батареи $Б$. Напряжение питания регулируется сопротивлением R_n в пределах от 1,3 до 2,3 В. При напряжении 2,2 В температура элементов $ЧЭ$ и $КЭ$ достигает $800-850^\circ\text{С}$. При такой температуре в камере K_1 сгорают все газы (легкие и тяжелые). При напряжении 1,3 В температура нитей достигает $500-550^\circ\text{С}$, когда сгорают в основном тяжелые газы — все, кроме метана.

При сгорании газов в камере K_1 температура $ЧЭ$ и его сопротивление будут уменьшаться по сравнению с сопротивлением

$КЭ$ пропорционально концентрации газов в газовоздушной смеси. Изменение напряжения питания моста дает возможность по величине $Г_{\text{сум}}$ судить о соотношении в смеси легких и тяжелых газов. Измерение газопоказаний выполняется регистрирующим прибором $РП$, включенным в диагональ моста. Баланс моста устанавливают с помощью реохорда R при пропускании через обе камеры K_1 и K_2 чистого воздуха.

Регистрирующий прибор станции фиксирует величины $Г_{\text{сум}}$ на ленте регистратора в виде точек через определенный заданный интервал квантования (0,5 или 1 м) в масштабах 1 : 500 или 1 : 200.

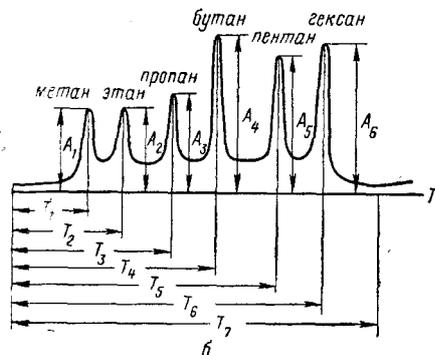
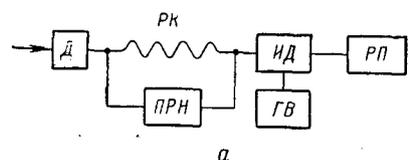


Рис. 158. Блок-схема хроматермографа (а) и вид хроматермограммы газов (б)

В станции АГКС-4 газоанализатор имеет чувствительность по метану 0,1%, а диапазон измерений от 0 до 10%.

Для компонентного анализа газа применяется хроматермограф (рис. 158, а). Основными узлами его являются дозатор $Д$, разделительная колонка $РК$, пламенно-ионизационный детектор $ИД$ и регистрирующий прибор $РП$.

Кран дозатора периодически подключает к газовоздушной линии трубку (дозатор) известного объема, которая заполняется анализируемой смесью.

Разделительная колонка представляет собой трубку из нержавеющей стали, заполненную сорбентом — высокодисперсным веществом с большой удельной поверхностью, обладающим высокой сорбционной способностью.

Для проведения компонентного анализа наполненный газовойоздушной смесью дозатор подключают к разделительной колонке

и продувают воздухом от компрессора. Поток воздуха наносит смесь газов на сорбент, где при дальнейшем продувании колонки воздухом и ее нагреве (по заданной программе) происходит разделение газов на компоненты. Оно основано на их различной сорбционной способности. Метан $С_1$ не сорбируется и сразу (в момент времени T_1) попадает на детектор. В дальнейшем при нагреве колонки и продувании воздухом в определенные моменты времени T_2, T_3, T_4, T_5 и T_6 выделяются из сорбента этан, пропан, бутан, пентан и гексан. Нагрев колонки проводится путем пропускания через ее стальную трубку электрического тока. После цикла анализа продолжительностью $T_7 = 130$ с колонка охлаждается с помощью вентилятора. Регулировка температурного режима колонки осуществляется автоматически по заданной программе прибором регулирования нагрева ПРН.

Концентрация газов, вышедших из разделительной колонки, измеряется термохимическим или пламенно-ионизационным детектором. Последний представляет собой водородную горелку, смонтированную в металлическом корпусе. Сопло горелки расположено между электродами, на которые подается высокое напряжение. В корпус горелки поступают газовоздушная смесь и водород от генератора водорода $ГВ$. Пламя горения чистого водорода почти не содержит ионов, поэтому его электропроводность ничтожна, и ток в цепи электродов отсутствует. При сгорании углеводородных газов в пламени образуются ионы, число которых пропорционально числу атомов углерода в молекуле анализируемого газа и его концентрации. Благодаря этому в цепи электродов протекает электрический ток, пропорциональный концентрации анализируемого газа и числу атомов углерода в молекуле газа.

Сигнал с выхода детектора подается на регистрирующий прибор, который в виде совокупности точек записывает в масштабе времени T кривую (хроматограмму) с отдельными пиками, соответствующими моментам времени T_1, T_2, \dots, T_6 . Амплитуды пиков A_1-A_6 пропорциональны содержанию отдельных компонентов в анализируемой смеси (см. рис. 158, б).

Буровой раствор при выходе из скважины проходит через измеритель объема. При прохождении каждой порции раствора объемом 12,5 л с измерителя объема подается электрический сигнал в запоминающее устройство станции. Оно суммирует сигналы за определенный интервал времени и суммарный сигнал подает на регистратор станции. Амплитуда суммарного сигнала пропорциональна $Q_{\text{вых}}$.

Для определения глубины забоя скважины в комплекте станции имеется глубиномер. Датчик его соединен с осью блока, через который протягивается канат, поддерживающий буровую штангу. Когда бурения нет, давление на блок отсутствует, датчик глубин не работает. В процессе бурения на блок оказывается давление, вследствие чего автоматически включается датчик глубин.

Глубиномер измеряет глубину забоя скважины в данный момент, которую называют действующей глубиной H_d .

В станциях типа АГКС регистрация измеряемых величин происходит дискретно в виде точек графика. Каждая точка относится к определенной глубине. Интервал скважины, соответствующий расстоянию между соседними точками, называется шагом l_k квантования. Он равен обычно 0,5 и 1 м. Запись ведется по команде сигналов глубин, поступающих на регистратор через шаг квантования.

На регистратор, записывающий $Q_{\text{вых}}$, с глубиномера поступают сигналы действующих глубин H_{kd} через шаг квантования l_k . По их команде и записываются суммирующие сигналы с запоминающего устройства.

Величина T_1 (мин/м) записывается как сумма сигналов времени от специального реле за интервал времени между двумя соседними сигналами H_{kd} . Коэффициент разбавления E регистрируется как сумма сигналов объема бурового раствора, выходящего из скважины, за интервал времени между двумя соседними сигналами H_{kd} .

При каждом сигнале H_{kd} величины $Q_{\text{вых}}$, T_1 и E последовательно фиксируются на ленте, которая затем протягивается на длину l_k и т. д.

Для параметров $Q_{\text{вых}}$, T_1 и E действующая глубина H_d равна истинной глубине $H_{\text{и}}$. При записи параметров $G_{\text{сум}}$, $G_{\text{пр}}$ и $C_1 - C_3$ истинная глубина, которой они соответствуют, меньше действующей на величину ΔH , которая называется отставанием. Отставание равно приращению глубины скважины за время отставания $T_{\text{от}}$, пока исследуемая порция бурового раствора дойдет от забоя по затрубному пространству до дегазатора. Если объем затрубного пространства равен v_c , то

$$T_{\text{от}} = \frac{v_c}{Q_{\text{вых}}}.$$

Для получения сигналов истинных глубин $H_{\text{ки}}$ сигналы H_{kd} с помощью записывающей головки наносятся на запоминающее устройство. Воспроизводящая головка его смещена по ходу движения от записывающей на величину v_c в масштабе протяжки ленты, а величина v_c пропорциональна сумме сигналов, поступающих с измерителя объема бурового раствора, вышедшего из скважины. Таким образом, сигналы H_{kd} задерживаются запоминающим устройством на переменный интервал времени $T_{\text{от}}$, следовательно, воспроизводящая головка будет считывать сигналы, соответствующие истинным глубинам. Они подаются на регистраторы $G_{\text{сум}}$ и $G_{\text{пр}}$ и служат командой для записи последних. Для определения приведенных газопоказаний в станции имеется счетно-решающее устройство, обеспечивающее нахождение $G_{\text{пр}}$ по формуле.

Для проведения люминесцентно-битуминологического анализа применяется люминоскоп. Он имеет приспособление для установки в нем пробирки с жидкой пробой и для исследования твердых проб. Пробы бурового раствора отбирают вблизи устья скважины в объеме около 200 см³, разбавляют в двух-трехкратном объеме воды, после чего ведут визуальное наблюдение за свечением или меряют его интенсивность. Сравнивая исследуемую пробу с эталонной, можно определить содержания в жидкой пробе нефти и ее качество, а в твердой пробе — содержание битумов. Пробы шлама перед люминесцентным анализом промывают в воде до удаления глинистого вещества, измельчают, иногда наносят на их поверхность каплю растворителя битумов-хлороформа или эфира.

Люминоскоп станции АГКС-4 имеет чувствительность по содержанию битуминозных веществ в буровом растворе не менее 0,001%.

Перед выполнением газового каротажа определяют коэффициент дегазации K_d , калибруют газоанализатор и хроматермограф. Величина K_d для поплавковых дегазаторов составляет обычно 0,01—0,02%, для шнековых — 0,1—0,2%.

Коэффициент дегазатора определяют путем глубокой дегазации (в специальных дегазаторах) пробы бурового раствора из желоба, где установлен дегазатор. Если n_1 и n_2 — показания регистрирующего прибора при измерении пробы газа из рабочего дегазатора и пробы, полученной при полной дегазации, то $K_d = n_1/n_2 \cdot 100\%$. Калибровка газоанализатора при установке нового чувствительного элемента выполняется путем пропускания смесей метана с воздухом с содержанием метана: 0,5; 1; 2 и 4%. По результатам эталонировки строят график, который используется для перевода показаний прибора в содержание газов в смеси. Перед началом рабочей смены калибровку газоанализатора проверяют путем пропускания 0,5% смеси метана. Полученное при этом показание прибора не должно отличаться от показания при калибровке более, чем на 10%. Это — показатель исправности чувствительного элемента.

Хроматермограф с термохимическим датчиком калибруют эталонной смесью химически чистых углеводородных газов с объемным содержанием порядка 2%. При этом на регистраторе запишется несколько пиков (по числу компонентов газа) различных амплитуд. Отношение $K_i = A_i/C_i$, где C_i — содержание данного газа в смеси, давшего амплитуду пика A_i , будет коэффициентом, с помощью которого вычисляют в дальнейшем содержание данного газа в измеряемой смеси.

При использовании люминоскопа эталоны содержаний нефти и битумов готовятся в лаборатории. Калибровка хроматермографа с пламенно-ионизационным датчиком выполняется смесью метана с воздухом в известной концентрации.

Поскольку величина ионизационного тока в детекторе пропорциональна числу атомов углерода молекулы газа, то, зная цену

показания регистратора для метана, можно рассчитать ее для другой фракции газа по соотношению чисел атомов углерода. Эталоны содержания нефти и битумов, необходимые для работы с люминоскопом, готовятся в лаборатории.

Газовый каротаж скважины выполняется непрерывно в процессе бурения. Станцию устанавливают на ровную площадку неподалеку от устья, изготовляют необходимого сечения желоб, устанавливают в нем дегазатор и измеритель объема раствора, устанавливают глубиномер. Монтируют газопроводную линию, соединяют ее со станцией. Станцию заземляют, включают и устанавливают необходимые режимы питания. Проверяют работу газоанализатора, хроматермографа, пропуская через них эталонный газ. Выполняют балансировку моста газоанализатора путем пропускания через него чистого воздуха. Записывают нулевые показания регистраторов, масштабы глубин, шаг квантования суммарных газопоказаний и работы хроматермографа. С началом бурения включают лентопротяжный механизм и ведут запись измеряемых параметров. На аномальных участках берут пробы бурового раствора и шлама на люминесцентно-битуминологический анализ.

4. Гравитационный каротаж

Гравитационный каротаж заключается в измерении силы тяжести в отдельных точках скважины. Он позволяет определять вертикальный градиент силы тяжести и среднюю плотность больших слоев горных пород.

Приращение силы тяжести между двумя точками a и b скважины, расположенными на расстоянии ΔH , можно представить в следующем виде:

$$\Delta g_{ab} = g_b - g_a = 0,3086 \Delta H - 4\pi K \sigma_{cp} \Delta H + \Delta g_r,$$

где $0,3086$ — нормальный вертикальный градиент, мгал/м; Δg_r — влияние пород, расположенных за пределами интервала ΔH . При наличии сети достаточной густоты скважин, зная средние значения плотности пород, величину Δg_r можно вычислить с помощью палеток для решения прямой задачи. Тогда из формулы можно получить величину средней плотности пород σ_{cp}^{ab} между точками a и b

$$\sigma_{cp} = \frac{0,3086 \Delta H + \Delta g_r - \Delta g_{ab}}{4\pi K \Delta H}.$$

Если по скважине известно распределение плотности пород, то можно определить изменение величины Δg_r , которая позволяет вычислить некоторые геометрические и физические параметры геологических объектов, расположенных за пределами скважины.

Гравитационный каротаж выполняют с помощью специальных скважинных гравиметров. Работают они по принципу наземных

кварцевых астазированных гравиметров, но имеют систему дистанционного управления компенсации изменений силы тяжести.

Скважинный гравиметр ГС-110 состоит из скважинного прибора с кварцевой системой и пульта управления, которые соединяются между собой с помощью семижильного бронированного кабеля КСБ-6.

В скважинном приборе на кварцевой нити KH (рис. 159) установлен маятник M с зеркальцем Z . На него падает свет от осветителя O и, отразившись, попадает на один из фотоэлементов Φ , включенных по дифференциальной схеме. Измерение в точке ведется компенсационным способом: маятник выводят в горизонтальное положение. Если маятник отклонился от горизонтального положения, то под действием отраженного от зеркальца Z луча в системе фотоэлементов возникает разбаланс токов, который фиксируется по гальванометру G . Для установки маятника в горизонтальное положение от блока питания $ПД$ той или иной полярности (в зависимости от того, в какую сторону отклоняется стрелка гальванометра) подают электрический ток на электродвигатель D . Он соединен с микрометрическим винтом $МВ$ и вращает его. В положении компенсации токи фотоэлементов становятся равными и стрелка гальванометра G устанавливается на нуле.

Вращение двигателя D преобразуется импульсным датчиком $ДИ$ в электрические импульсы. Они передаются на счетчики C_1 и C_2 . При вращении двигателя D (и вместе с ним винта $МВ$) в одну сторону импульсы регистрируются счетчиком C_1 , а в другую сторону — счетчиком C_2 . Включение того или иного счетчика осуществляется с помощью реле P в зависимости от полярности подаваемого на двигатель D напряжения. После установки маятника в горизонтальное положение снимают показания со счетчиков C_1 и C_2 .

Кварцевая система заключена в герметичный корпус и установлена в кардановом подвесе скважинного прибора в теплозащитном сосуде Дьюара. Для ускорения затухания колебаний системы и повышения теплоемкости сосуд Дьюара заполняется трансформаторным маслом.

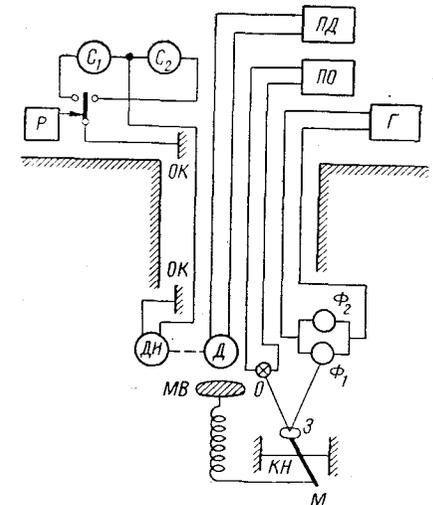


Рис. 159. Принцип работы скважинного гравиметра ГС-110

Питание лампочки осветителя осуществляется от аккумуляторов 5-НКН-100 (ЛО), а электродвигателя и отсчетного устройства от двух батарей ГРМЦ-69. Сила тяжести измеряется с погрешностью 0,15—0,2 мгал в диапазоне до 5 мгал.

В скважины диаметром более 110 мм прибор спускается с помощью стандартного подъемника СКП-3000. Определение цены показания счетчиков прибора выполняют теми же методами, что и для наземных гравиметров. Наблюдение начинают с компенсации силы тяжести и отсчета N_1 на поверхности земли около устья скважины. Затем прибор опускают на необходимую глубину, дают успокоиться системе в течение 3—5 мин, а затем компенсируют изменение силы тяжести и записывают показание счетчиков C_1 и C_2 . Интервал наблюдений по скважине составляет обычно 50—100 м. После окончания наблюдений снова берут отсчет N_2 при установке прибора около устья скважины. Разница в отсчетах ($N_2 - N_1$), умноженная на цену деления счетчика, дает величину смещения нуля-пункта прибора.

Вычисление силы тяжести в точках скважины ведется по такой же методике, что и в наземной гравиразведке.

Термический каротаж

Термический каротаж заключается в непрерывном измерении температуры вдоль оси скважины: полученная кривая называется **термограммой**.

Изменения температуры по скважине можно разделить на региональные и локальные.

Региональные изменения заключаются в постепенном увеличении температуры с глубиной с некоторым градиентом G , который называют **геотермическим**. Он представляет собой число градусов, на которое возрастает температура горных пород при углублении на 100 м. В среднем эта величина равна 3,3°С/100 м. Величина, обратная геотермическому градиенту, называется **геотермической ступенью G** . Она означает расстояние в метрах, при углублении на которое температура возрастает на 1°С. В среднем величина G равна 33 м/°С. Сравнивая, как изменяются величины G и G в различных скважинах на большой территории, можно решать задачи структурной региональной геологии. Так, в пределах антиклинальных структур тепловые потоки внутреннего тепла земной коры распространяются ближе к поверхности, поэтому геотермический градиент будет здесь выше, чем в пределах синклиналиальных структур.

Локальные изменения температуры по скважине связаны с изменением состава горных пород, притока воды и других причин. При растворении в жидкости скважины пластов каменной соли против них наблюдается понижение температуры. То же самое наблюдается против газоносных пластов, где температура понижается из-за падения давления при выделении газов.

На участках пересечения скважиной водоотдающих пластов температура изменяется в ту или иную сторону в зависимости от соотношения температур воды и бурового раствора. При цементации затрубного пространства скважины в процессе затвердевания цемента в нем повышается температура, что дает возможность определить высоту цементного кольца.

Геотермический каротаж выполняют с помощью скважинных термометров, датчиками которых являются термочувствительные резисторы из медного или платинового провода. Они позволяют измерять температуру от 0 до 150—250°С. В глубинных электронных термометрах типа ТЭГ резисторы R_t подключены к RC -генератору.

Генератор G питается от источника стабилизированного постоянного тока 120 мА напряжением 250 В (рис. 160). Период колебаний генератора пропорционален величине сопротивлений R_t .

Длительность периода колебаний генератора измеряется на поверхности периодометром $ПМ$, с выхода которого напряжение, пропорциональное температуре среды, окружающей скважинный прибор, записывается регистратором $РП$ каротажной станции. С помощью сопротивлений R_n регулируют пределы измерения температуры. Визуальный отсчет температуры контролируется по индикатору $И$. Аппаратура состоит из скважинного прибора и наземной панели и эксплуатируется в комплекте с каротажными станциями, работающими на одножильном (бронированном) кабеле. Термочувствительные резисторы помещены в герметические медные трубки, контактирующие с буровым раствором. Для уменьшения тепловой инерции трубки залиты кремний-органической жидкостью.

В одних термометрах (ТЭГ-60 и ТЭГ-60а) имеется управляемый с поверхности переключатель. С помощью его к RC -генератору вместо резисторов R_t можно подключить эталонные сопротивления, соответствующие температурам 20 и 100°С, для калибровки прибора. В других термометрах (ТЭГ-36) имеется RC -генератор на поверхности с двумя фиксированными периодами автоколебаний, соответствующими 20 и 100°С. Их подключают к схеме скважинного прибора во время калибровки.

В скважинном приборе термометра на трехжильном кабеле размещается мостовая схема, два противоположных плеча которой являются термочувствительными резисторами. Мост пи-

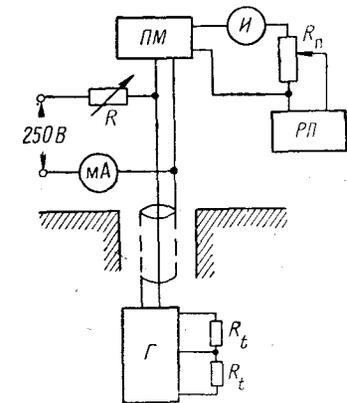


Рис. 160. Блок-схема электро-термометра

тается током I . При изменении температуры окружающей среды в измерительной диагонали моста меняется напряжение небаланса ΔU , которое передается на поверхность в регистрирующий прибор.

Электрические термометры воспринимают измеряемую температуру с течением времени по экспоненциальному закону

$$\Delta t = \Delta t_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_t}} \right),$$

где Δt — изменение температуры термометра с течением времени t ; Δt_0 — разность между температурами термометра и окружающей среды в начальный момент времени $\tau = 0$; τ_t — постоянная времени или тепловая инерция термометра. Чем меньше величина τ_t , тем быстрее термометр воспринимает температуру окружающей среды. При $\tau = \tau_t$ $\Delta t = 0,63 \Delta t_0$.

Таким образом, постоянная τ_t равна времени, в течение которого термометр воспринимает 63% разности температур термометра и окружающей среды. Для термометров типа ТЭГ постоянная времени равна 2 с.

Методика проведения термометрии зависит от решаемых ею задач. Геотермический каротаж можно подразделить на методы, изучающие естественное или искусственное тепловое поле. Метод естественного поля применяется для наблюдения геотермического градиента и расчленения горных пород по тепловому сопротивлению. Для выполнения работ по методу естественного теплового поля скважину выдерживают в состоянии покоя в течение нескольких суток. Диаграмму температур записывают при спуске термометра. Это позволяет избежать искажений, связанных с перемешиванием бурового раствора.

Метод искусственного теплового поля применяется для расчленения горных пород по тепловому сопротивлению, определения поглощающих и отдающих пластов, определения высоты подъема цементного кольца.

Искусственное поле создается путем промывки скважины буровым раствором, температура которого на $10-12^\circ$ отличается от температуры исследуемых пород, или в результате экзотермической реакции охватывания цемента при цементации затрубного пространства.

Температурные исследования выполняют через несколько часов после промывки скважины.

Для определения места притока воды и затрубной циркуляции в скважину закачивают буровой раствор с температурой, резко отличающейся от температуры окружающих пород. Закачивание раствора ведут до тех пор, пока температура его не будет постоянной. В этом убеждаются, выполняя контрольный замер. Затем путем откачки раствора понижают его уровень. Это вызывает приток воды из водоносных пластов. Поскольку температура их отличается от температуры закачанного бурового рас-

твор, то при последующей записи термограммы против мест притоков отмечаются аномалии. Местоположение поглощающего пласта определяют путем последовательных продавливаний раствора в скважину, сопровождаемых измерениями температуры. Поглощающий пласт отмечается по резкому изменению температуры, которое наблюдается на всех термограммах.

Перед выполнением каротажа оценивают погрешность измерений прибора в баке с водой различной температуры, измеряя одновременно ее ртутным термометром. Если прибор предназначен для измерения геотермического градиента или расчленения пластов, то допускается расхождение в показаниях скважинного и ртутного термометров не более $0,5^\circ \text{C}$, а в остальных случаях до 2°C .

Масштаб записи термограммы (градус/см) в приборах на одножильном кабеле устанавливают при подключении эталонных сопротивлений или при подаче стандарт-сигналов. В термометрах на трехжильном кабеле для установки масштаба M регистрирующий прибор подключают к эталонному резистору R_0 в питающей цепи и добиваются отклонения пишущего устройства, равного $l = C (R_0/M)$. Это условие обеспечивают путем изменения силы тока и постоянной по напряжению.

Цену в единицы показаний ГКП рассчитывают по формуле

$$e = \frac{M}{m}.$$

Температура среды, в которую помещен термометр, определяется для приборов с колебательным контуром по формуле

$$t = t_0 + C_1,$$

а для приборов с мостовой схемой по формуле

$$t = t_0 + C \left(\frac{\Delta U}{I} \right),$$

где t_0 — начальная температура; C — постоянная термометра. Величины t_0 и C определяют при градуировке приборов. Градуировка заключается в измерениях приборами в термостате, температура которого меняется от 20 до 100°C с интервалом $5-10^\circ \text{C}$. По результатам градуировки строят график, откладывая по оси ординат температуру термостата, а по оси абсцисс — показания периодомера или отношение $\Delta U/I$. Продолжая линию графика до пересечения с осью ординат, находят величину t_0 . Выбирают два значения температуры на графике (t_1 в начале и t_2 в конце) и находят соответствующие им отсчеты по оси абсцисс, затем определяют постоянную термометров по формуле

$$C = \frac{(t_2 - t_1)}{(f_2 - f_1)}$$

(для приборов с колебательным контуром) или по формуле

$$C = \frac{(t_2 - t_1) I}{(l_2 - l_1) m}$$

(для приборов с мостовой схемой). Здесь l — отклонение пишущего устройства, m — постоянная по напряжению измерительного канала. При градуировке термометров с одножильным кабелем записывают показания прибора при включенных температурных сопротивлениях или от стандарт-сигналов и сравнивают их с фактическими показаниями в термостате. Расхождение между ними не должно превышать десятых долей градуса, что является показателем исправной работы прибора.

Скорость перемещения v м/ч скважинного прибора при термокартаже зависит от постоянной времени τ_c термометра и выбирается из соотношения $v\tau \leq 1200$.

При отбивке цементного кольца и измерении температуры при неустановившемся режиме допускается увеличение скорости в 2 раза. Масштаб принимают обычно 0,5 и 0,25° С/см.

Перед началом каротажа записывают положение нулевой линии регистрирующего прибора, отклонение пишущего устройства от стандарт-сигналов, показание при нахождении термометра в емкости с раствором или в воздухе, а также при нахождении термометра в скважине в начальной точке записи термограммы.

При отработке термограммы температура определяется по формуле

$$t = t_0 + Ml + P\varepsilon,$$

где P — показание на ГКП.

В методе естественного теплового поля геотермический градиент и геотермическая ступень определяются по формулам

$$\Gamma = \frac{100(t_2 - t_1)}{H_2 - H_1}, \quad G = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1}$$

где t_1 и t_2 — температуры соответственно на глубинах H_1 и H_2 .

§ 71. РАЗЛИЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ В СКВАЖИНАХ

1. Измерение искривления скважин

Искривление скважины характеризуется азимутом A плоскости искривления и углом α отклонения оси скважины от вертикали. Эти данные необходимы для нанесения оси скважины на разрез определения истинной мощности пластов и запасов месторождений полезных ископаемых, а также для интерпретации данных магнитного каротажа, наклонметрии и других методов.

Для измерения искривления скважин в слабомагнитных горных породах применяются инклинометры, использующие принцип

отвеса и магнитной стрелки, а в сильномагнитных породах — гироскопические инклинометры.

Принцип работы инклинометров первого типа показан на рис. 161, а.

Датчиками элементов искривления служат угловой $УР$ и азимутальный $АР$ реохорды со стрелками отвеса ($С\alpha$) и азимута ($С\alpha$), жестко скрепленные с рамкой инклинометра. Она под действием эксцентричного груза устанавливается таким образом,

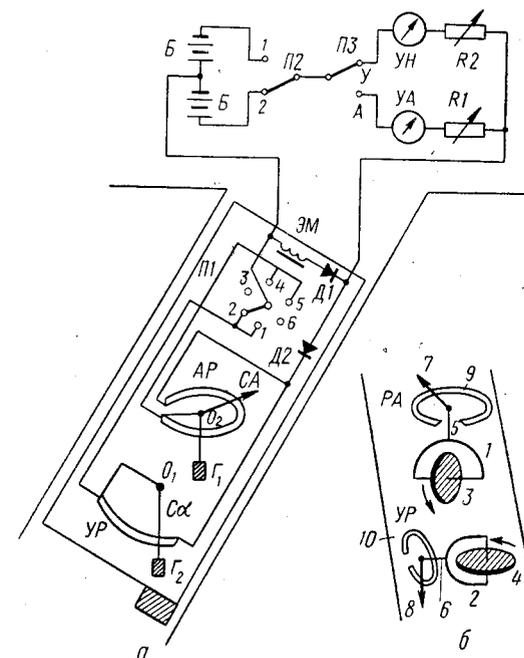


Рис. 161. Принцип работы инклинометра с отвесом и магнитной стрелкой (а) и гироскопического (б)

что плоскость углового реохорда совпадает с плоскостью искривления скважины. Плоскость реохорда $АР$ под действием груза $Г_1$ устанавливается горизонтально. Под влиянием груза $Г_2$ стрелка $С\alpha$ принимает отвесное положение.

На реохорды от батареи $Б$ подается электрический ток, величину которого регулируют сопротивлениями R_1 и R_2 . Во второй позиции переключателя $П2$ ток течет через диод $Д1$ и обмотку электромагнита $ЭМ$, с помощью которого меняются позиции переключателя $П1$ скважинного прибора. В первой позиции переключателя $П2$ ток течет через диод $Д2$ и

угловой реохорд (в позициях 1 и 2 переключателя П1 и позиции У переключателя П3) или азимутальный реохорд (в позициях 4 и 5 переключателя П1 и позиции А переключателя П3). В первой позиции переключателя П1 стрелка α находится в свободном состоянии и в схему питания включается полное сопротивление реохорда $УР$. В этой ситуации, меняя сопротивление R_2 , стрелку указателя наклона (миллиамперметра, проградуированного в градусах угла α) устанавливают на нуль. При переводе переключателя П1 в позицию 2 стрелка α с помощью реле прижимается к реохорду $УР$, закорачивая часть сопротивления реохорда, пропорционально углу α . Отсчет угла берут по прибору $УН$. Аналогично изложенному, в четвертой позиции переключателя П1, когда реохорд $АР$ полностью включен в схему питания, устанавливают нулевой отсчет по прибору $УА$. В пятой позиции переключателя П1 магнитная стрелка прижимается к реохорду $АР$, а прибор $УА$ показывает величину азимута A .

В инклинометрах последних выпусков для измерений углов α и A применяют мостиковую схему. В ней при полностью включенном реохорде мост балансируют; а при контакте стрелки с реохордом измеряют величину тока небаланса прямым или компенсационным способами.

В инклинометрах описанного типа (ИК-1, И-7, ИТ-200, ИТ-2, УМН-25 и др.) угол α измеряется от 0 до 45—50° с погрешностью 30—50', азимут от 0 до 360° с погрешностью 5°. Датчики размещены в немагнитном корпусе, заполненном для успокоения системы кремний-органической жидкостью. Измерение ведется поточно. После остановки прибора система прибора в течение 10—12 с успокаивается.

Гирскопические инклинометры основаны на способности гироскопа — вращающегося диска (волчка) — сохранять заданную ориентировку плоскости вращения. В скважинном приборе (см. рис. 161, б) диск 3 на рамке 1 вращается в вертикальной плоскости, а диск 4 на рамке 2 вращается в горизонтальной плоскости. Оси 5 и 6 рамок соединены со стрелками 7 и 8, а последние контактируют с реохордами 9 и 10.

Около устья скважины плоскость диска 3 ориентируют по меридиану или по другому азимуту, а плоскость диска 4 — горизонтально. Затем прибор опускают в скважину. Вращающиеся диски — гироскопы — в процессе движения прибора по скважине сохраняют установленные ориентировки, а рамки гироскопов под действием эксцентричных грузов меняют свое положение: плоскость рамки гироскопа 3 устанавливается в плоскости искривления скважины, а плоскость рамки гироскопа 4 — перпендикулярно к оси скважины. В связи с этим положения указателей 7 и 8 на реохордах 9 и 10 будут зависеть от углов искривления скважины A и α . Через реохорды протекает электрический ток, и падение напряжения на незакороченных участках реохорда

будет определяться величинами A и α . В гирскопических инклинометрах имеется возможность непрерывной регистрации измеряемых параметров.

В результате работы инклинометров получают величины α и A в точках скважины, которые обычно относят к отрезку скважины на интервале от данной точки наблюдения до нижележащей. По результатам наблюдений строят горизонтальную проекцию линии скважины (рис. 162, а), а также проекцию скважины на плоскость разреза (рис. 162, б). Для того, чтобы получить горизонтальную проекцию, например, отрезка $Об$ скважины, пользуются величинами α и A , полученными при измерении в точке O . Величина проекции $Об'$ отрезка $Об$ определяется по формуле $Об' = Об \sin \alpha$, а угол B , под которым отрезок направлен к линии географического севера (дирекционный угол) определяется по формуле $B = A + \gamma \mp D$, где D — магнитное склонение (восточное прибавляется, западное вычитается); γ — угол между осевым меридианом и меридианом в данной точке. Таким же образом получают отрезки $б'в'$, $в'г'$ и т. д. Полученная ломаная линия $Об'в'г'$ изображает горизонтальную проекцию оси скважины. Для получения ее проекции на плоскость разреза вычисляют дирекционный угол B' . Горизонтальную проекцию скважины проектируют на линию разреза $лр$, вычисляют длину проекций отрезков $Об$, $бв$ и т. д. на плоскость разреза:

$$Об'' = Об' \cos \Delta B_i, \quad Об''' = Об \cos \Delta B_i,$$

где ΔB_i — соответствующая разница дирекционных углов линии профиля и проектируемого отрезка. Далее через точки O , $б''$, $в''$, $г''$ линии профиля проводят вертикальные линии. Затем, проводя из точки O окружность радиусом $Об'''$, находят точку $б'''$ пересечения с линией $б''$. Далее проводя из точки $б'''$ окружность радиуса $б'''в'''$, находят точку $в'''$ пересечения с линией $в''$ и т. д. Полученная ломаная линия $Об'''в'''г'''$ изображает проекцию линии скважины на плоскость профиля. Применяют и другие приемы обработки данных инклинометрии.

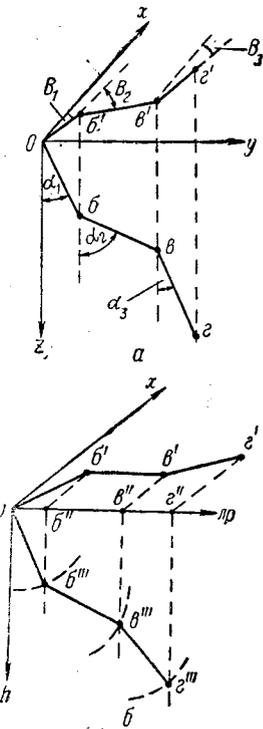


Рис. 162. Построение проекции оси скважины на горизонтальную плоскость (а) и плоскость разреза (б)

2. Измерение диаметра скважин

Сведения об изменении диаметра скважин необходимы для оценки ее технического состояния (наличия каверн, сужений), при интерпретации результатов большинства методов каротажа, а также для расчленения разреза.

При проходке скважины в сыпучих и пластичных породах (глинах, песках) вследствие разрушения стенок при бурении и движении бурового раствора диаметр будет увеличиваться. В крепких скальных породах такого явления не наблюдается.

Измерение диаметра выполняют с помощью каверномеров. Применяются рычажные и фонарные каверномеры, работающие

в комплекте с автоматическими каротажными станциями на трехжильном и одножильном (бронированном) кабелях. Принцип работы рычажного каверномера на трехжильном кабеле (типов КСУ, КМ) показан на рис. 163, а. Через потенциометр R от источника B протекает постоянный ток. Его величина контролируется прибором $МА$ и регулируется сопротивлением R_T . С некоторой части потенциометра R с помощью указателя $У$ снимается падение напряжения ΔU_{MN} . Его величина зависит от положения указателя $У$, а последний связан с движением штока $Ш$.

На корпусе скважинного прибора на оси O установлен рычаг,

большое плечо которого скользит по стенке скважины, а малое передвигает шток $Ш$. Таким образом, изменения диаметра скважины передаются через шток на указатель $У$ и тем самым на величину падения напряжения, снимаемого с потенциометра R между точками A и указателем $У$. Падение напряжения записывается регистрирующим прибором $РП$. Кроме описанного рычага, на корпусе имеются еще два или три рычага, которые центрируют прибор. В фонарном каверномере (типа КФМ) датчиком является система рычагов типа фонаря (см. рис. 163, б). Нижние концы $НК$ рычагов закреплены на корпусе K прибора неподвижно, а верхние присоединяются к подвижной муфте M , которая, скользя вдоль корпуса, передвигает шток и связанный с ним указатель потенциометра. Рычажные каверномеры перед спуском в скважину требуется предварительно прикреплять концами рычагов к корпусу и раскрывать их на забое. С этой целью применяют

кольца, которые разрываются на глубине по команде с поверхности от небольшого количества взрывчатого вещества или системы гидравлического раскрытия, использующие разницу в гидростатических давлениях в приборе и скважине. Фонарные каверномеры не требуют таких устройств. С их помощью имеется возможность повторить измерение на интервале скважины, опустив прибор на большую глубину.

Каверномеры на одножильном кабеле имеют мостовую схему измерений. Три плеча моста находятся в наземной панели, четвертое переменное сопротивление — в скважинном приборе. Величина его меняется в зависимости от диаметра скважины по принципу, описанному для каверномеров на трехжильном кабеле. Степень нарушения баланса моста характеризует изменения диаметра.

Измеряемая каверномером величина диаметра d равна

$$d = d_0 + C \left(\frac{\Delta U}{I} \right),$$

где d_0 — начальный диаметр (при сложенных рычагах); I — сила тока питания; ΔU — разность потенциалов, записываемая регистрирующим прибором; C — постоянная каверномера, определяемая при эталонировании.

Каверномеры градуируют с помощью градуировочных колец различного диаметра. По результатам градуировки строят график, откладывая по оси абсцисс диаметр колец, а по оси ординат — отклонение пишущего устройства. Постоянную каверномера определяют по формуле

$$C = \frac{d_2 - d_1}{l_2 - l_1} \frac{I}{m},$$

где d_2 и d_1 — значения диаметра в начале и конце градуировочного графика; l_1 и l_2 — соответствующие им отклонения пишущего устройства; m — постоянная по напряжению.

Экстраполируя график до пересечения с осью абсцисс, определяют величину d_0 .

Регистрацию кавернограммы при детальном исследовании выполняют в масштабах 1 : 2 и 1 : 1, в остальных случаях 1 : 5. Масштаб регистрации кавернограммы n устанавливают по отклонению пишущего устройства l при подключении измерительного канала к эталонному сопротивлению R_0 токовой цепи

$$l = C \left(\frac{R_0}{n} \right).$$

В каверномерах на трехжильном кабеле масштаб устанавливают с помощью градуировочного кольца. В каверномерах на одножильном кабеле масштаб записи устанавливают по стандарт-сигналу с панели управления.

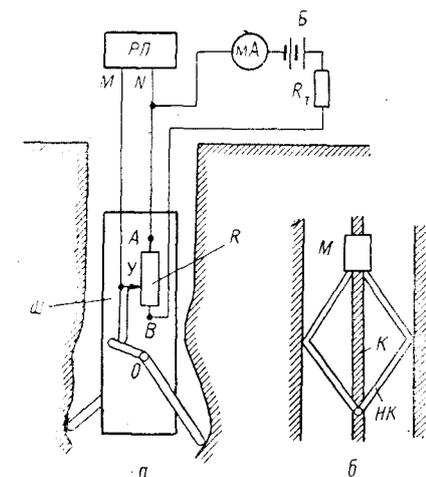


Рис. 163. Принцип работы рычажного (а) и фонарного (б) каверномеров

Перед измерением диаметра скважины записывают положение нулевой линии или показания при сжатых рычагах прибора, показания при нахождении прибора в градуировочном кольце или при полностью раскрытых рычагах. Измерения выполняют со скоростью не более 2000 м/ч. После записи кавернограммы регистрируют показания в колонне на интервале не менее 10 м с отбивкой ее башмака. По записи в колонне определяется погрешность измерений, которая не должна превышать $\pm 1,5$ см.

Кривую изменения диаметра (кавернограмму) используют при геологической интерпретации геофизических методов.

3. Измерение наклона пластов

Сведения об углах наклона пластов, встреченных скважиной, необходимы для точного построения геологического разреза. Углы наклона пластов определяют с помощью пластовых наклономеров путем снятия трех кривых сопротивлений трех заземлений СЗ или ПС. По смещению характерных точек аномальных кривых, записанных по трем линиям скважины, можно определить падение пласта относительно ее оси. Привлекая для обработки данные инклинометрии, полученные в этом пласте, можно определить угол его отклонения относительно горизонтальной или вертикальной плоскости. Если в скважине, пересекающей наклонный пласт, выполнить измерения ПС или СЗ тремя электродами M_1 , M_2 и M_3 и построить графики, то при наличии пластов горизонтального залегания аномалии будут полностью совпадать. При наличии изображенного на рис. 164 наклонного пласта максимум аномалии электрода M_1 будет ниже максимума электрода M_2 , а последний — выше максимума электрода M_3 . Величины смещения максимумов будут зависеть от наклона пластов и направления его падения: в случае падения пласта в сторону электродов M_1 и M_2 , их аномалии будут совпадать, а аномалия электрода M_3 запишется выше и т. д.

Принципиальные схемы записи кривых ПС, СЗ или ТК аналогичны схемам соответствующих методов. Кривые ПС обычно записываются по схеме потенциала с электродами N_1 , N_2 , N_3 , заземленными около устья скважины. Кривые СЗ записываются по мостиковым схемам.

Конструкция пластового наклономера напоминает вид фонарного каверномера. На участках сочленения рычагов, скользящим по стенкам скважины, установлены башмаки, в каждом из которых имеется по одному электроду. Наклономеры представляют сложное устройство (прибор НП-2), включающее инклиномер, каверномер, а также дополнительный датчик, измеряющий угол β между плоскостью искривления скважины и плоскостью, проходящей через ось прибора и один из ориентирующих электродов M . Наклономер НП-3 состоит из трех каналов, записывающих по

мостиковой схеме сопротивления заземлений A_1 , A_2 , A_3 и датчика угла β . Наклономеры подключаются к автоматическим каротажным станциям на трехжильном кабеле, которые позволяют одновременно регистрировать три параметра. Масштабы записи для всех кривых выбираются крупными, что дает возможность получить в зоне пласта наиболее интенсивные аномалии. Работа с наклономерами ведется на отдельных участках скважины, где расположены исследуемые пласты. Они должны отчетливо выделяться на диаграммах ПС и СЗ.

Элементарную обработку результатов измерений можно выполнить геометрическим путем (рис. 165). Развернем участок скважины, предположив его вертикальным на плане, приняв за

нулевой отсчет линию, расположенную на пересечении оси 0—360°. Затем нанесем положение точек максимумов на этом участке по всем трем электродам, в соответствии с глубинами, отсчитанными

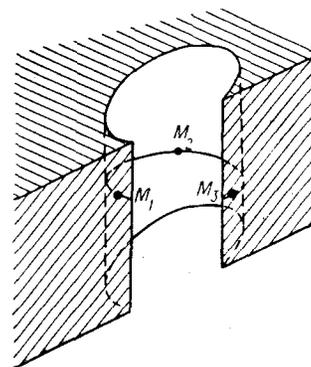


Рис. 164. Сущность определения наклона пластов

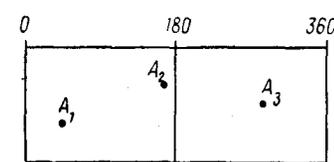


Рис. 165. Принцип обработки данных инклинометрии

по диаграммам. Если после этого лист снова свернуть в «скважину», придать ему необходимое искривление по углу β и по азимуту (на основании замера ориентации электрода A_1), то плоскость, проведенная через точки A_1 , A_2 , A_3 , смоделирует падение пласта. Эту работу можно выполнить на специальном ориентирующем устройстве и точки наносить на прозрачной бумаге, тогда будет возможность с приемлемой для практики точностью получить угол и азимут падения пласта.

Аналитически задача нахождения элементов залегания пласта выполняется с помощью сложных формул, номограмм и ЭВМ.

4. Отбор грунтов, перфорация и торпедирование скважин

Отбор проб из стенок скважин выполняется для того, чтобы уточнить и дополнить сведения, полученные по керну в процессе бурения, проверить и уточнить результаты интерпретации каротажа. По результатам опробования уточняют состав пород, определяют их физические, химические, коллекторские свойства

и другие параметры. Пробы из стенок скважины отбирают с помощью боковых стреляющих или сверлящих грунтоносов.

Боковой стреляющий грунтонос БГС (рис. 166, а) имеет корпус из высокопрочной стали. В корпусе перпендикулярно к оси ствола расположены пороховые камеры 1 с электрозапалами 5, связанными с детонирующим шнуром 4. В камеру ввинчивается ствол 2, в который вкладывают боек — полый патрон 3, имеющий острые наружные края. К электрозапалам по жилам кабеля подается электрический ток. Пороховой заряд взрывается, боек выталкивается и врзается в породу. После этого грунтонос поднимают, и боек, соединенный с корпусом прибора стальным тросиком 6, вместе с пробой извлекают на поверхность.

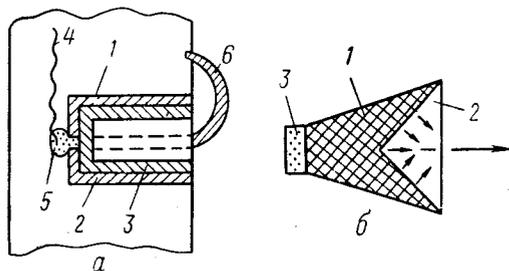


Рис. 166. Схемы устройства стреляющего грунтоноса (а) и кумулятивного заряда (б)

Стреляющие грунтоносы применяются в пластичных и не очень твердых породах. В крепких породах (известняки, доломиты, ангидриты) стреляющие грунтоносы малоэффективны, так как силы заряда недостаточны для врезания бойка в породу. В таких случаях применяют боковые сверлящие грунтоносы типа БСГ. В них отбор проб ведется с помощью буровой коронки диаметром 32 мм с кернорвателем, которая приводится во вращение трехфазным двигателем переменного тока, подводимого с поверхности через три жилы кабеля. Образцы отбираются в виде кернов диаметром 22 и длиной до 50 мм. Время отбора одной пробы 1—2 мин. Отобранная проба выталкивается в кассету, которая может вмещать до 10 образцов. Таким образом, за один спуск можно опробовать несколько интервалов.

Перфорация заключается в простреле обсадной колонны и цементного кольца с целью создать сообщение между полостью скважины и окружающими породами. Это бывает необходимым для вскрытия нефтеносных, газоносных или водоносных пластов, для возобновления или интенсификации нефте- и водоотдачи пластов и в других целях. Пробивка колонны и цементного кольца выполняется пулевыми, снарядными и кумулятивными перфораторами. Пулевой перфоратор по устройству аналогичен стреляющему грунтоносу, только из ствола выстреливается не боек, а заостренная пуля. Перфораторы состоят из нескольких сборных секций. В каждой из них содержится от 3 до 10 стволов.

Диаметр канала ствола колеблется от 10 до 12,7 мм. Пулевые перфораторы делятся на селективные, в которых пули выстреливаются поочередно, и залповые.

К снарядным перфораторам относится торпедный перфоратор ТПК-22. Он содержит несколько секций. В каждой из них имеется две пороховые камеры с гнездами для стволов. В выстреливаемом цилиндрической формы снаряде содержится около 5 г взрывчатого вещества и взрыватель замедленного действия. Снаряд выстреливается из ствола, пробивает обсадную колонну, цементное кольцо и после этого взрывается в породах, создавая этим самым наилучшие условия для сообщения пластов со скважиной.

Наибольшую пробивную способность имеют кумулятивные перфораторы, имеющие кумулятивный заряд. В перфораторе ПК-103 заряд состоит (см. рис. 166, б) из пластмассовой или металлической оболочки, в которой помещено взрывчатое вещество 1. Оболочка с передней части закрыта бумажной манжетой, а заряд имеет коническую выемку 2, ограниченную медной воронкой. В задней части оболочки расположен взрыватель 3, к которому подводится детонирующий шнур. При возбуждении заряда энергия взрыва фокусируется по направлению оси заряда, медная воронка сжимается под громадным давлением (до 10^6 кг/см²), при котором металл течет как жидкость. В результате этого вдоль оси воронки в сторону стенки скважины выбрасывается со скоростью 8—10 км/с высокоплотная струя расплавленного металла, оказывающего давление на преграду около 300 кг/см². Это давление намного превышает предел прочности стали, цемента и горных пород.

Кумулятивные заряды помещаются в корпусных и бескорпусных перфораторах. В бескорпусных перфораторах каждый заряд помещается в индивидуальную оболочку, и с помощью каркасов и лент создаются целые гирлянды зарядов, направляющие воронки которых располагаются под углом 120° одна к другой. Корпусные перфораторы могут быть однократного и многократного действия. В первом случае их корпуса изготавливают из непрочных и хрупких материалов, которые после взрыва разрушаются. Корпусы перфораторов многократного действия изготавливают из высокопрочной стали.

Перфораторы опускают в скважины с помощью специальных каротажно-перфораторных самоходных подъемников.

Торпедирование выполняется с помощью торпед — металлических цилиндров, внутренняя часть которых заполнена взрывчатым веществом (тротилом, гексогеном и их смесью в виде сплавов). Применяются герметичные (Ф-2, ТБ, ТГ) и негерметичные (ТШ, ТШБ, ТДШ) торпеды. Герметичные торпеды имеют прочный стальной корпус, выдерживающий высокое давление. При взрыве его образуются осколки оболочки, которые засоряют скважину. Корпус негерметичной торпеды состоит из пластмассы или алю-

миния небольшой толщины. При взрыве не образуется осколков. В негерметичных торпедах заряд состоит обычно из шашек флегматизированного гексогена. Торпеды взрываются по команде с поверхности с помощью закладываемых в заряд промежуточных взрывателей и детонаторов.

Торпедирование выполняется для вскрытия нефте- и водоносных пластов, очистки фильтров и зон перфорации, с целью ликвидации аварий, тушения пожаров на нефтяных и газовых скважинах.

Перед началом торпедирования на скважине рабочее место очищают от посторонних предметов, скважину прорабатывают и очищают, глинистый раствор заменяют водой или раствором другого качества, согласно техническим условиям; в интервале торпедирования устанавливают нижний цементный мост, в который будет упираться торпеда.

Перед спуском вставляют взрыватель. Скорость спуска не должна превышать 1000 м/ч при постоянном контроле за ней динамометром. Глубину торпедирования определяют по меткам кабеля. По мере приближения торпеды к цементному мосту скорость снижают. После остановки торпеды запальную цепь замыкают, и происходит взрыв торпеды.

§ 72. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Геологическая интерпретация данных каротажа проводится с целью литологического расчленения горных пород скважин и выявления полезных ископаемых, определения их глубины залегания и мощности, оценки содержания и качества полезных ископаемых, их структурного залегания и площади распространения.

Обычно объектом интерпретации являются результаты комплекса каротажных исследований. Он выбирается с таким расчетом, чтобы геологические задачи решались достаточно уверенно в различных условиях и при минимальных затратах времени и средств.

Рассмотрим характеристики измеряемых параметров горных пород и полезных ископаемых (табл. 13). В графах таблицы значками и буквами обозначены положительные (+), отрицательные (—) аномалии, высокие (В), низкие (Н) и средние (С) показания на диаграммах каротажа.

Резкие колебания показаний КС горных пород объясняются изменением их водонасыщенности и минерализации воды. Положительные потенциалы ПС соответствуют конгломератам, глинистым карбонатным породам и антрацитам, отрицательные —

Горные породы и полезные ископаемые	ρ_k , Ом·м	ПС	ГК	НГК (зона > 30 см)	Аномалия температуры искусственного теплового поля	Продолжительность прохождения 1 м	Суммарное газопоказание
Глина	1—10 до 20—30	+	В	Н	+	Низкая	—
Глинистый сланец	5—30	+	В	С	+	Н, С	—
Мергель	5—1000	+	С	С	+, — (небольшой амплитуды)	С, В	—
Песок	от 0,3 до 1000	—	Н, С	Н, С	—	Н	—
Песчаник	от 0,8 до 1000	—	В, С	С, В	—	С, В	—
Конгломерат и галечник	5—1000	+, —	С	С	—	С, В	—
Карбонатные породы	2—10 000	+, —	Н	С, В	—	С, В	—
Гидрохимические осадки	>1000	—	Н, В	Н, В	—	Н, С	—
Изверженные породы	В	—	С, В	В	—	В	—
Нефть	В, С	≈ 0	Н	Н	—	Н	В
Горючий газ	С, В	≈ 0	Н	В	—	Н, В	В
Ископаемый уголь	0,001 (антрациты) — 10 000 (битуминозные угли)	+, —	Н, В	—	+	Н	В
Металлические полезные ископаемые	Н	+	Н, С, В	—	—	В	—

галечникам, чистым карбонатным породам (известняки и доломиты), битуминозным углям.

Показания ГК повышаются при увеличении глинистости и содержания монацитовых песков. Интенсивность НГК понижается с увеличением пористости и водородосодержания. В горючих газах показания НГК возрастают.

В табл. 13 отсутствуют данные магнитного, акустического, индукционного и многих разновидностей ядерного каротажа,

имеющих специфическое применение, а также детализационные методы (ТК, МЭП и др.).

С учетом данных табл. 13 и возможностей других методов для каждого полезного ископаемого или их группы применяют определенный комплекс методов.

Для расчленения разреза скважины используют связь между литологией пород и показаниями каротажа и расчленяют породы непосредственно по результатам геофизических исследований (см. табл. 13) или путем корреляции привязывают изучаемый разрез к типовому геолого-геофизическому разрезу, по которому устанавливают последовательность и литологический состав пластов.

Типовые геолого-геофизические разрезы содержат стратиграфическую и литологическую колонки, описание литологического состава, диаграммы каротажа, комплекс которых зависит от особенностей геологического разреза и целей каротажа. Типовой разрез должен быть типичным для данного района или участка как по геологическому строению, средней мощности пластов, их падению, так и по условиям измерений. На типовых разрезах выделяют опорные горизонты (реперы), которые используют при корреляции их с изучаемыми разрезами.

1. Определение глубины залегания и мощности пластов

Определение местоположения и мощности пластов различных горных пород и полезных ископаемых основано на использовании характерных особенностей аномальных кривых каротажа.

Наиболее сложный характер имеют аномалии на диаграммах метода КС, форма которых во многом зависит от соотношения размера зонда L и мощности h пласта. Если пласт имеет высокое удельное сопротивление $\rho_{\text{п}}$ по сравнению с вмещающими породами $\rho_{\text{вм}}$, то для кровельного градиент-зонда при $h > L$ кривая имеет вид, показанный на рис. 167, а (1); при $h < L$ кривая приобретает форму, показанную на рис. 167, б. На рис. 167, а (2) приведена кривая для потенциал-зонда. Для мощных пластов по диаграмме, полученной при записи кровельным градиент-зондом, кровля определяется по точке, смещенной на $MN/2$ выше максимума, а подошва смещена на такое же расстояние вверх от характерного минимума. Мощность определяется как расстояние между экстремальными точками $\rho_{\text{к}}^{\text{max}}$ и $\rho_{\text{к}}^{\text{min}}$.

Для пластов малой мощности по кривой кровельного градиент-зонда определяют глубину залегания кровли пласта по точке, смещенной вниз на расстояние AO от характерного экранного максимума $ЭМ$ (см. рис. 167, б). Истинная мощность равна при-

ближенно ширине максимума кривой на высоте $2/3$ его амплитуды. Подошва определяется как сумма величин глубины кровли и мощности пласта.

По кривой КС потенциал-зонда против мощного пласта ($h \gg AM/2$) сначала определяют точки e и c (см. рис. 167, а), где кривая переходит от медленного к резкому подъему. Положение подошвы пласта смещено на расстояние $AM/2$ ниже точки e ,

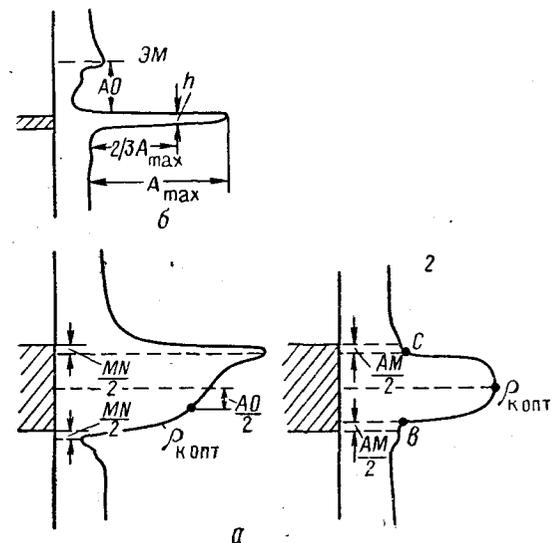


Рис. 167. Кривые КС в мощных (а) и тонких (б) пластах высокого сопротивления.
1 — кривые градиент-зонда;
2 — кривые потенциал-зонда

а кровли—на то же расстояние выше точки c . На диаграммах микрозондов границы пластов определяются по резким отклонениям (подъему и спаду) кривой. Также определяют границы пластов по диаграммам МСК и электродных потенциалов.

На диаграммах бокового каротажа проводят наклонные касательные к наиболее крутым участкам кривой. Для трехэлектродного зонда границы пласта определяются точками пересечения касательных к прямой, соответствующей удельному сопротивлению вмещающих пород. Для семиэлектродного зонда длиной L кровля расположена выше, а подошва — ниже на $0,3 L$ соответствующих точек.

На диаграммах ПС, ВП, ИК и КМВ, ГК и ядерных методов каротажа границы пластов большой мощности определяют по точкам, расположенным на середине амплитуды аномалии. В тонких пластах характерные точки несколько смещены к середине пласта, поэтому определенная по ним мощность будет завышена.

По кривой градиента потенциала ПС границы пластов определяются по максимуму и минимуму кривой.

2. Определение удельного сопротивления пластов

Удельное сопротивление пластов приближенно можно определить по диаграммам КС, бокового каротажа, а более точно — методом БКЗ.

Для пластов, мощность которых значительно превышает размер зонда, величина ρ_k против середины пласта близка к истинному удельному сопротивлению, если она зарегистрирована зондом оптимального размера, исключая влияние скважины. Для пластов, соизмеримых по мощности с длиной зонда или меньше его, для определения удельного сопротивления применяются палетки ПКМ (пластов конечной мощности) или ЭКЗ.

По результатам бокового каротажа удельное сопротивление пластов при отсутствии проникновения фильтрата бурового раствора определяют по теоретически рассчитанным кривым зависимости

$$\frac{\rho_k^{\max}}{\rho_n} = f\left(\frac{h}{a}\right),$$

снимая с кривой значение ρ_k^{\max} .

По результатам индукционного каротажа отсчет по кривой кажущейся электропроводности при небольшом проникновении бурового раствора близок к истинному значению электропроводности. В других случаях необходимо исключать влияние скважины и вводить поправки за ограниченную мощность пласта.

Более точно удельное сопротивление определяют по результатам БКЗ, которые представляют в виде практических кривых зависимости ρ_k от длины зондов. Для построения практической кривой БКЗ по диаграммам КС различных зондов определяют характерные значения ρ_k . При мощности пласта от 6 до 20 м снимают оптимальные значения ρ_k . На диаграммах потенциал-зондов оптимальное значение равно значению ρ_k в середине аномалии (см. рис. 167, а, 2). На диаграммах градиент-зондов (см. рис. 167, а, 1) оптимальное значение равно величине ρ_k в точке, смещенной от середины пласта на расстояние $AO/2$ вверх (с обращенным зондом) или вниз (с последовательным зондом).

Оптимальное значение $\rho_{k \text{ опт}}$ может быть отсчитано для зондов, размеры которых не превышают 0,8 мощности пласта. Для пластов большой мощности ($h > 20$ м) кривая зондирования строится по среднему значению кажущегося сопротивления.

Среднее кажущееся сопротивление равно частному от деления площади, ограниченной линией $\rho_k = 0$ и кривой ρ_k против пласта, на величину мощности пласта.

По полученным величинам ρ_k на билогарифмический бланк наносят по оси абсцисс величины L , а по оси ординат — величины ρ_k , соединив отдельные точки, получают практическую кривую БКЗ.

На бланк наносят линии, соответствующие ρ_p и d_c (их пересечение называют крестом кривой), а также линии h и $\rho_{\text{вм}}$, пересечение которых называют точкой учета мощности.

Практическую кривую БКЗ накладывают на двухслойную палетку (см. рис. 136), совмещая оси абсцисс и ординат палетки с линиями ρ_p и d_c . Если буровой раствор в пласт не проникает, то практическая кривая: 1) совпадает с одной из теоретических кривых модуля $\mu = \rho_n/\rho_p$ и тогда удельное сопротивление пласта вычисляют по формуле $\rho_n = \mu\rho_p$;

2) интерпретируемая кривая укладывается между двумя теоретическими кривыми с модулями μ_1 и μ_2 , и для вычислений берут среднее значение этих модулей.

Если практическая кривая сечет теоретические, то имеется понижающее или повышающее проникновение фильтрата бурового раствора. Такие кривые интерпретируют по палеткам трехслойных кривых.

При мощности пласта менее 6 м строят кривые экстремальных значений ρ_k , например их максимумов. Интерпретируют такие кривые по палеткам экстремальных кривых зондирования ЭКЗ. По результатам применения микрозондов определяют мощность глинистой корки $h_{\text{ГК}}$ и удельное сопротивление промытой зоны $\rho_{\text{пп}}$, прилегающей к скважине части проницаемого пласта. Определение ведут на основе данных $\rho_{\text{пз}}$ и $\rho_{\text{Гз}}$, измеренных с микропотенциал-зондом и микроградиент-зондом, а также величины удельного сопротивления глинистой корки $\rho_{\text{ГК}}$, которую определяют в лабораторных условиях. Величины определяют по семейству кривых $\rho_{\text{пп}}/\rho_{\text{ГК}}$ и $h_{\text{ГК}}$, нанесенных в координатах $\rho_{\text{Гз}}/\rho_{\text{ГК}}$ (ось абсцисс) и $\rho_{\text{пз}}/\rho_{\text{ГК}}$ (ось ординат). На номограмму наносят точку с координатами $\rho_{\text{Гз}}/\rho_{\text{ГК}}$ и $\rho_{\text{пз}}/\rho_{\text{ГК}}$, местоположение которой и определяет величины $\rho_{\text{пп}}$ и $h_{\text{ГК}}$.

3. Определение пористости и других параметров

Высокопористые обводненные пласты выделяются низкими показаниями на диаграммах КС и микрозондов, нейтронного и акустического каротажа (по скорости упругих волн). Высокопористые газоносные пласты отмечаются высокими показаниями КС и НГК. В водонефтяном контакте нефть выделяется повышенным значением КС по сравнению с водой.

где ρ_n — удельное сопротивление нефтеносного (или газоносного) пласта; $\rho_{вм}$ — удельное сопротивление пласта при 100%-ном заполнении его водой; n — показатель степени, который подбирают экспериментально применительно к условиям залежи или считают равным 2.

Величину $\rho_{вм}$ можно определить как удельное сопротивление этого же пласта за пределами контура нефтеносности (или газоносности).

Данные о распространении нефтегазосного пласта, его мощности, коэффициентов нефтегазонасыщенности и пористости площадью S позволяют определить запасы нефти Q_n (или газа) в пласте. Если пласт однородный и одинаковой площади, то запасы нефти определяют по формуле

$$Q_n = \sigma_n S h k_n k_{пн},$$

где σ_n — плотность нефти в пластовых условиях. Запасы газа выражаются (в m^3) по формуле

$$Q_g = S h k_n k_{пг}.$$

Практически пласт часто неоднороден по величинам h , k_n и $k_{пн}$, тогда его разбивают на элементарные участки, где они одинаковы, и общие запасы находят путем суммирования запасов на отдельных участках.

5. Интерпретация данных каротажа скважин на угольных месторождениях

На угольных месторождениях по данным каротажа выделяют угольные пласты, определяют глубину их залегания и мощность, внутреннее строение, определяют качественную характеристику (степень углефикации и зольность).

По степени углефикации (содержанию углерода) выделяют бурые угли, содержащие 65—73% углерода, каменные угли с содержанием углерода 78—95%, и антрациты, имеющие максимальное содержание углерода (95%). Другим важным качеством углей является их зольность. Зольность характеризует остаток от сгорания органической части угля и разложения минерального вещества. При высокой зольности (более 50%) порода относится к углистому сланцу. По мере увеличения степени углефикации уменьшается удельное сопротивление и увеличивается плотность (от 1,15 до 1,75 г/см³) углей. При увеличении зольности растет плотность углей, повышается гамма-активность. Поэтому малозольные бурые угли выделяются (рис. 170) повышенными значениями на диаграммах ГГК-II, КС и пониженными на диаграммах ГК, каменные угли — высокими показаниями ГГК-II, КС, а антрациты — повышенными показаниями ГГК-II, высокими значениями ПС, пониженными показаниями ГК.

На основе изучения корреляционной зависимости показаний каротажных диаграмм от содержания углерода (тип углей) имеется

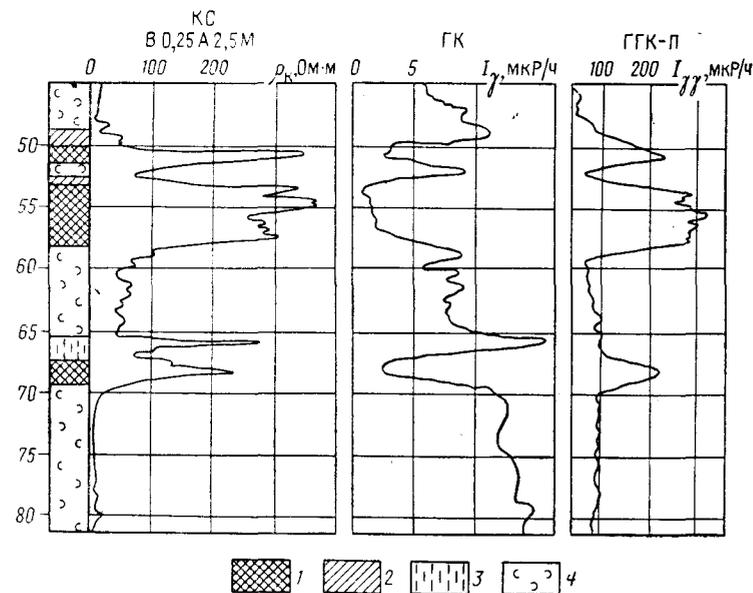
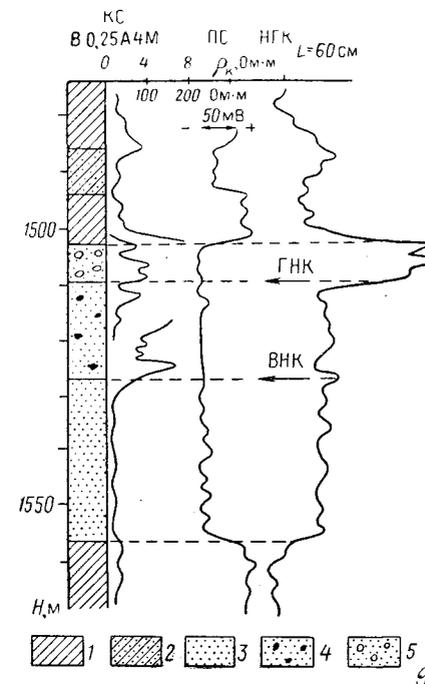


Рис. 170. Каротажные диаграммы на месторождении бурого угля. 1 — уголь; 2 — углистый аргиллит; 3 — конгломераты; 4 — аргиллиты

возможность разделить угли по их качеству. Зольность определяют по ее корреляционной связи с показаниями методов КС и ГГК-П, а иногда ГК.

По результатам методов МСК и МЭП изучают внутреннее строение угольных пластов.

6. Интерпретация данных каротажа скважин рудных месторождений

В скважинах рудных месторождений по данным каротажа определяют глубину и мощность рудных интервалов, а также количественно оценивают содержание полезного ископаемого. По данным некоторых видов каротажа (магнитного и гравитацион-

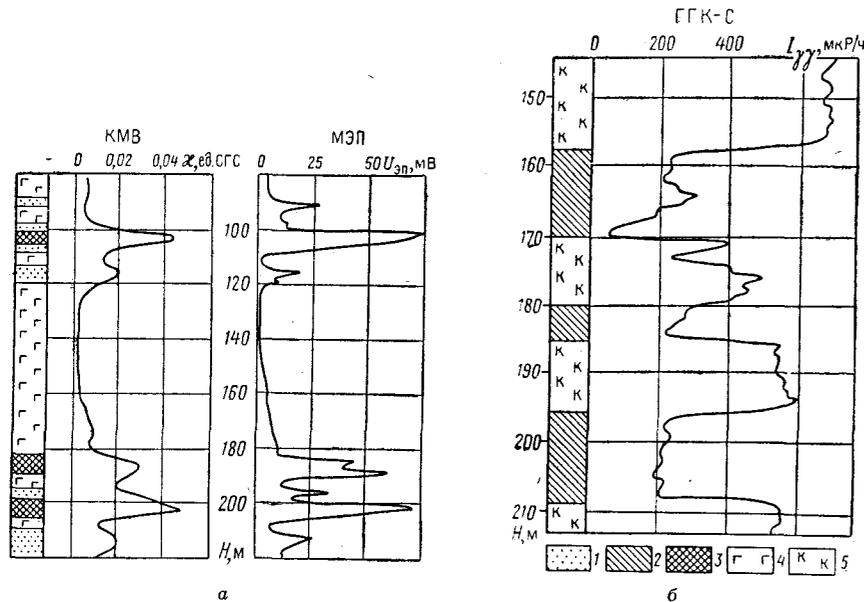


Рис. 171. Диаграммы магнитного каротажа на месторождении магнетита (а) и диаграммы ГГК — С на месторождении сидеритов (б).
1 — скарны; 2 — сидериты; 3 — магнетиты; 4 — породы основного состава; 5 — кварциты

ного) имеется возможность выполнять поиски рудных залежей в межскважинном и подзбойном пространстве.

Местоположение магнетитовых руд (рис. 171, а) в разрезе скважины выделяют по максимальному показанию диаграмм КМВ и МЭП, а слабомагнитные руды (гематит, сидерит, гидрогетит) — по уменьшению показаний ГГК-С (рис. 171, б). Магнетит, имеющий высокую электропроводность, выделяется по диаграммам КС, а по диаграммам МСК и МЭП имеется возможность уточнить внутреннее строение рудных интервалов. Приближенная

оценка содержания железа выполняется на основе диаграмм КМВ, ГГК-П и ГГК-С.

Совместное применение методов ГГК и КМВ позволяет выделить железо магнитное и немагнитное.

Сплошные руды цветных металлов (меди, цинка, свинца, серебра, никеля) выделяют по минимумам диаграмм КС и ПС, а внутреннее их строение по диаграммам методов МСК и МЭП (рис. 172). Такие же характеристики имеют графитизированные

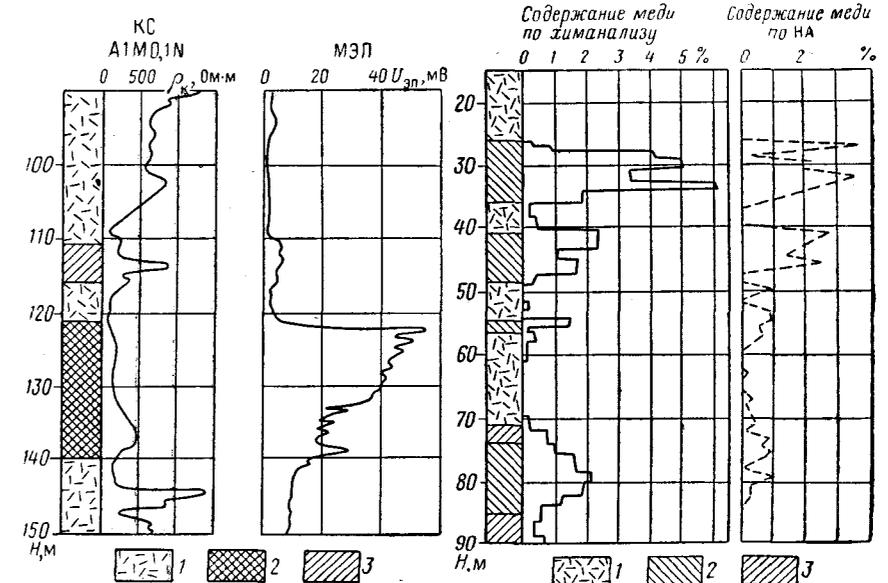


Рис. 172. Диаграммы методов КС и МЭП
Рис. 173. Диаграммы метода НА и график содержания меди по химическому анализу.
1 — туфы липарито-дацитов; 2 — руда сплошная; 3 — вкрапленная руда

и пиритизированные интервалы, что является помехой при выделении руд.

Вкрапленные руды — плохой проводник, поэтому их отбивают по диаграммам ВП. Окисленные руды (сфалерит) неэлектропроводны, поэтому их выделяют по уменьшению показаний на кривых ГГК-П и ГГК-С, что связано с повышенной плотностью или эффективным атомным номером. Метод ГГК-С дает хорошую эффективность не только для сплошных, но и для вкрапленных окисленных руд.

Некоторые типы руд, содержащие ферромагнитные минералы (магнетит и пирротин), выделяются по диаграммам КМВ.

Содержание меди определяют методом наведенной активности (рис. 173) по изотопам ^{66}Cu с периодом полураспада $T = 5,1$ мин

и изотопу ^{64}Si с периодом $T = 12,8$ ч. В первом случае время облучения составляет 5—20 мин, во втором — несколько часов. Полученные результаты приводятся к бесконечно большому времени облучения.

В первом методе мешающий элемент — изотоп ^{28}Al , который образуется из стабильного изотопа ^{27}Al , с периодом $T = 2,27$ мин.

Содержание тяжелых элементов (свинца, ртути, цинка и др.) определяют по методу ГГК-С.

Каменные бокситы выделяются повышенной радиоактивностью на диаграммах ГК, а магнетитсодержащие бокситы — по методу КМВ. Содержание алюминия определяют методом наведенной активности по изотопу ^{28}Al .

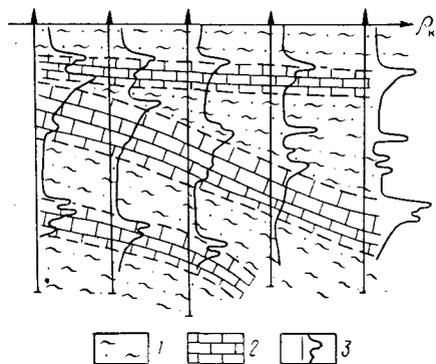


Рис. 174. Корреляция разрезов скважин по диаграммам ГК.
1 — песчано-глинистые породы; 2 — известняки; 3 — кривые ГК

Бороносные пласты, ввиду высокого сечения захвата тепловых нейтронов (725 барн) атомами бора, выделяются низкими показаниями на диаграммах нейтронного каротажа.

Марганцевые руды устанавливаются по пониженным показаниям нейтронного каротажа НК-Т, поскольку марганец обладает высоким сечением захвата (13,2 барн) тепловых нейтронов. Процентное содержание марганца определяют методом наведенной активности по изотопу ^{56}Mn с периодом полураспада 2,64 ч.

Флюорит определяют методом наведенной активности на фтор по изотопу ^{20}F с периодом полураспада 10,7 с, наличие и содержание бериллия — по фото-нейтронному каротажу, калийные соли — по гамма-каротажу на основе радиоактивности изотопа ^{40}K . Наличие и содержание тяжелых элементов (вольфрама, молибдена, олова, ртути, сурьмы), имеющих высокий атомный номер, определяют методом ГГК-С.

7. Построение профильных разрезов и структурных карт

Данные каротажа скважин месторождения, участка или района позволяют выделить характерные для них горизонты (пласты), определить их глубину залегания в различных скважинах, т. е. положение в пространстве. Эта работа называется кор-

реляцией разрезов скважин. Для корреляции применяют различные методы каротажа, по которым выделяются хорошо выдержанные литологически однородные пласты (рис. 174).

Для выполнения корреляции большое значение имеют реперы (опорные горизонты), выделяемые на типовых геолого-геофизических разрезах. Реперами могут служить толщи песчано-глинистых пород в карбонатном разрезе, мощные толщи глин, пласты известняков и мергелей в терригенных породах, пласты углей и угленосных пород и др.

Корреляция хорошо проводящих рудных подсечений в скважинах облегчается благодаря применению специальной модификации метода заряда.

При корреляции пользуются описанием керна и палеонтологическими определениями.

По результатам корреляции строят профильные разрезы, структурные карты рельефа кровли или подошвы пласта, карты равных мощностей. При построении разрезов в первую очередь соединяют опорные горизонты, затем остальные пласты. Структурные карты строят в виде изолиний кровли или подошвы наиболее характерных и выдержанных пластов, а также пластов, содержащих полезные ископаемые.

Профильные разрезы и структурные карты позволяют составить представление о тектонике района, участка или месторождения, о расположении в разрезе, мощности и строении пластов, содержащих полезные ископаемые, распространении их по площади и о других данных. Карты равных мощностей полезного ископаемого — исходный материал для подсчета его запасов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Растущие потребности экономики нашей страны в минеральном сырье стимулируют постоянное увеличение его запасов.

Резерв мелкозалегающих, легко открываемых месторождений полезных ископаемых уменьшается, а поиски глубокозалегающих месторождений требуют увеличения глубинности и разрешающей способности геофизических методов. Важным условием развития геофизических методов является повышение производительности и снижение стоимости работ, определяющих экономическую эффективность геофизических методов. Ее повышение достигается путем совершенствования старых и разработки новых методов, видов аппаратуры, методики полевых наблюдений и камеральной обработки, умелым выбором комплекса геофизических исследований.

Совершенствование аппаратуры геофизических методов развивается по линии увеличения ее точности, помехоустойчивости, комплексности, долговечности, уменьшения размеров, экономичности питания и транспортабельности. Увеличение точности и помехоустойчивости аппаратуры ведет к возможности регистрации более слабых сигналов, вызванных незначительными изменениями физических параметров геологических объектов и тем самым к увеличению количества полезной информации, выделению слабых аномалий от глубокозалегающих объектов.

Большое значение для удешевления работ имеет создание комплексной аппаратуры. Большая работа в этом направлении проводится при создании аэрогеофизической, каротажной и электроразведочной аппаратуры. В частности, в каротажной аппаратуре увеличение комплексности методов сдерживалось ограниченным количеством жил кабеля (2, 3, 7), поэтому в подавляющем большинстве случаев измерялось одновременно не более двух параметров. В последнее время на основе применения частотной модуляции разработана комплексная аппаратура (НП-2, БКР и др.) на одножильном (бронированном) и трехжильном кабеле для одновременной регистрации от трех до шести параметров.

Важным условием успешного совершенствования аппаратуры является унификация ее основных узлов. Такая работа широко проводится в сейсморазведочной и каротажной аппаратуре.

Остро необходима унификация электроразведочной и радиометрической аппаратуры. Для унифицированной аппаратуры легче наладить серийное производство, проще заниматься ее усовершенствованием. Усовершенствовав какой-то один узел, можно быстро наладить его серийный выпуск и произвести замену во всех

видах аппаратуры. Унификация позволяет облегчить наладку и ремонт аппаратуры. Она увеличивает долговечность аппаратуры, ибо создает возможность для работы каждого ее узла до полного износа.

С уменьшением размеров и экономичности питания увеличивается транспортабельность аппаратуры, уменьшается число обслуживающего персонала, появляется возможность использовать ее в переносном варианте в труднодоступных условиях, увеличить производительность труда и уменьшить стоимость работ. Интересно заметить, что первые отечественные гравиметры СН-3 имели массу около 30—40 кг. Для питания их служили громоздкие аккумуляторы (30—40 кг). В связи с этим один прибор обслуживали оператор, техник, ведущий запись, и четверо рабочих (двое из них переносили прибор, двое — аккумуляторы). Производительность составляла 10—15 точек в смену. В настоящее время гравиметр типа ГМТ-2 имеет массу 8 кг, питание его осуществляется от портативного аккумулятора. Практически с прибором работают оператор и помощник со средней производительностью 150—200 точек за смену. В настоящее время создана переносная портативная аппаратура для магнитной съемки и радиометрии, некоторые типы аппаратуры для электроразведки.

Ведется работа по уменьшению массы и габаритов аппаратуры типа ИКС, АФИ, ВП, МПП. Создание портативной аппаратуры «Енисей» метода ВП, работающей на небольших токах, позволяет использовать, кроме схемы срединных градиентов, другие типы установок электрического профилирования, что повышает результативность метода и расширяет области его применения.

Важное место в общем процессе геофизических исследований занимает автоматизация обработки полевых наблюдений. В этом направлении многое сделано и делается в области сейсмической разведки, каротажа и аэрогеофизической съемки. В сейсморазведке с помощью цифровых вычислительных машин получают временные разрезы, наглядно отражающие особенности глубинной структуры и напоминающие геологический разрез.

В каротажных исследованиях с помощью ЭВМ выполняют интерпретацию кривых БКЗ, определяют пористость или относительное сопротивление по измерениям с микрозондом, пористость по данным радиоактивного каротажа, удельное сопротивление пластовой воды по результатам ПС, нефтегазонасыщенность и другие параметры коллекторов.

Успешно ведется работа по обработке и интерпретации на ЭВМ данных магнитотеллурических методов. Внедряется машинная обработка, включая построение планов изолиний параметров магнитного поля, общей радиоактивности и соотношения между содержанием урана, тория и калия по результатам аэрогеофизической съемки. Информация для ввода в память ЭВМ должна быть записана в двоично-цифровом коде. С этой целью в сейсморазведке существуют и совершенствуются цифровые станции типа

ССЦ и др. В каротажных и аэрогеофизических исследованиях применяются для регистрации величин преобразователи типа аналог—код. Каротажный преобразователь ПМ-3 в двоично-цифровом коде может регистрировать одновременно четыре параметра из группы методов электрического и радиоактивного каротажа, резистивиметрии, термометрии и кавернометрии. Кодовые сигналы с преобразователя могут быть введены непосредственно в память машин типа «Минск», а через устройство ввода информации УВИ в машины «Урал», БЭСМ и др.

Созданы программы для обработки, трансформации и некоторых приемов интерпретации наземных гравиразведочных и магнитных данных. Однако подготовка информации для ввода в память ЭВМ выполняется вручную и занимает много времени. Обработанные данные необходимо также вручную выносить на планы. По этой причине преимущества машинной обработки снижаются, а иногда и вообще сводятся на нет, ввиду большого объема подготовительных и заключительных трудоемких работ. В последнее время созданы программы «Изолиния», позволяющие полученный материал представлять с помощью графопостроителей в виде геофизических планов.

Однако производительность графопостроителя мала по сравнению с быстродействием вычислительных машин. Многие предстоит еще сделать по внедрению машинной цифровой обработки в сейморазведке и в других методах.

Автоматизированная обработка геофизических данных позволяет значительно больше извлекать полезной информации, а это предъявляет жесткие растущие требования к точному и методически правильному исполнению полевых геофизических наблюдений. Эту работу может выполнить лишь специалист высокой технической квалификации.

1. Гринкевич Г. И. Магниторазведка. М., «Недра», 1971. 272 с. с ил.
2. Грушинский Н. П., Сажина Н. Б. Гравитационная разведка. Изд. 2-е, испр. и доп. М., «Недра», 1972. 389 с. с ил.
3. Гурвич И. И. Сейсмическая разведка. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1975. 408 с. с ил.
4. Комаров С. Г. Геофизические методы исследования скважин. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1973. 367 с. с ил.
5. Кунциков Б. К., Кунцикова М. К. Общий курс геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (лабораторные и практические занятия). М., «Недра», 1972. 288 с. с ил.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-69). Изд. 2-е, М., Атомиздат, 1972. 86 с.
7. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений (ОСП-72). М., Атомиздат, 1974. 55 с.
8. Померанц Л. И. Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование. М., «Недра», 1966. 314 с. с ил.
9. Радиометрия и ядерная геофизика. М., «Недра», 1974. 304 с. с ил. Авт.: Л. В. Горбушина, Д. Ф. Зимин, В. В. Нагля, Л. И. Овчинников.
10. Соколов К. П. Геофизические методы разведки. М., «Недра», 1966. 464 с. с ил.
11. Якубовский Ю. В., Ляхов Л. Л. Электроразведка. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Недра», 1974. 376 с. с ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. Основные понятия и положения геофизических методов разведки	
§ 1. Общие сведения	3
§ 2. Физические поля и аномалии	5
§ 3. Основные петрофизические характеристики горных пород	11
§ 4. Влияние геологических факторов на физические свойства горных пород	23
§ 5. Методика изучения физических свойств горных пород	24
§ 6. Геолого-геофизические разрезы	26
§ 7. Методика полевых геофизических исследований	28
§ 8. Представление результатов геофизических работ	32
Глава II. Магниторазведка	
§ 9. Магнитное поле Земли и его элементы	34
§ 10. Исследование магнитного поля Земли с помощью искусственных спутников и ракет	37
§ 11. Нормальное магнитное поле Земли	39
§ 12. Магнитные аномалии	40
§ 13. Изменение магнитного поля Земли во времени	41
§ 14. Постоянные магниты и их взаимодействие	44
§ 15. Понятие об абсолютных измерениях элементов геомагнитного поля	46
§ 16. Относительные измерения элементов геомагнитного поля	49
§ 17. Краткая характеристика основных видов аппаратуры для наземных магнитных съемок	52
§ 18. Методика и техника проведения наземных магниторазведочных работ	56
§ 19. Камеральная обработка материалов наземной магнитной съемки	59
§ 20. Аэромагнитная съемка	61
1. Принцип работы аэромагнитометров	61
2. Методика и техника аэромагнитной съемки	65
3. Обработка результатов аэромагнитной съемки	65
§ 21. Измерение магнитных свойств образцов	69
§ 22. Геологическое истолкование результатов магнитной съемки	72
§ 23. Геологические задачи, решаемые методом магниторазведки	79

Глава III. Гравитационная разведка		81
§ 24. Сила тяжести. Закон всемирного тяготения	81	81
§ 25. Гравитационный потенциал и его производные	83	83
§ 26. Нормальное гравитационное поле Земли	85	85
§ 27. Редукции силы тяжести	87	87
§ 28. Аномалии силы тяжести	89	89
§ 29. Понятие об абсолютных измерениях силы тяжести	90	90
§ 30. Относительные измерения силы тяжести	91	91
1. Принцип измерений	91	91
2. Кварцевые астазироваанные гравиметры	93	93
3. Гравиметры металлические астазироваанные	96	96
§ 31. Методика и техника полевых наземных гравиразведочных работ	98	98
§ 32. Камеральная обработка результатов наблюдений наземной съемки	100	100
§ 33. Гравиметры для относительных измерений силы тяжести на дне водоемов	101	101
§ 34. Гравитационные вариометры и градиентометры	103	103
1. Принцип действия и основы теории гравитационных вариометров	103	103
2. Краткая характеристика аппаратуры для вариометрической съемки	106	106
3. Полевые наблюдения с градиентометром и обработка результатов	108	108
§ 35. Измерение плотности горных пород	110	110
§ 36. Геологическое истолкование результатов гравиразведки	111	111
1. Качественная интерпретация аномалий	111	111
2. Выделение локальных аномалий	113	113
3. Количественная интерпретация аномалий	115	115
4. Примеры применения гравиразведки	118	118
Глава IV. Электрическая разведка		120
§ 37. Основные положения теории электроразведки искусственно созданным постоянным током	122	122
1. Поле точечных заземлений	122	122
2. Заземления, применяемые в электроразведке	127	127
3. Установки для работы методом сопротивлений	129	129
§ 38. Аппаратура метода сопротивлений	132	132
1. Принцип устройства аппаратуры на постоянном токе	132	132
2. Электроразведочные стрелочные компенсаторы	135	135
3. Электроразведочные станции	137	137
4. Морская электроразведочная аппаратура	139	139
5. Аппаратура для работы на переменном токе низкой частоты	140	140

6. Источники питания, провода и электроразведочное оборудование	142	4. Свойства радиоактивных излучений	216
§ 39. Электрическое профилирование	143	5. Единицы измерения естественной радиоактивности	218
§ 40. Электрическое зондирование и определение удельного сопротивления горных пород	150	6. Эталоны радиоактивности	219
1. Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)	150	§ 51. Приборы для регистрации радиоактивных излучений	220
2. Методика полевых работ по методу ВЭЗ	154	1. Ионизационная камера	220
3. Интерпретация результатов метода ВЭЗ	157	2. Газоразрядные счетчики	221
4. Дипольное электрическое зондирование	159	3. Сцинтилляционные счетчики	223
5. Определение удельного электрического сопротивления горных пород	160	§ 52. Полевая радиометрическая аппаратура	225
§ 41. Метод заряда	161	1. Полевые переносные радиометры	225
§ 42. Метод естественного электрического поля	165	2. Полевые гамма-спектрометры	228
1. Общие сведения	165	3. Автомобильные гамма-радиометры	230
2. Методика полевых работ	167	4. Самолетные и вертолетные радиометры	231
3. Обработка и интерпретация полевых материалов	169	5. Настройка и эталонирование радиометров	232
§ 43. Метод вызванной поляризации	171	§ 53. Аппаратура для эманационной съемки	235
§ 44. Основные положения теории электроразведки переменным током	176	§ 54. Аппаратура для измерения радиоактивности проб в лабораторных условиях	236
1. Понятие о переменном электромагнитном поле	176	§ 55. Методика радиометрических поисков радиоактивных руд	238
2. Способы создания и измерения переменных и нестационарных электромагнитных полей и приемы измерения электрической и магнитной составляющих напряженности поля	178	1. Аэрометрическая и автомобильная съемки	239
§ 45. Магнитотеллурические методы	181	2. Наземная пешеходная гамма-съемка	240
1. Общие сведения	181	3. Полевая эманационная съемка	241
2. Аппаратура магнитотеллурических методов	183	4. Измерение радиоактивности пород в горных выработках	242
3. Методика, обработка и интерпретация результатов полевых наблюдений	186	5. Измерение радиоактивности проб воды в полевых условиях	243
§ 46. Метод переходных процессов	190	6. Лабораторные методы исследования радиоактивности проб	243
§ 47. Методы электромагнитного зондирования	194	§ 56. Применение радиометрических методов при геологическом картировании и поисках нерадиоактивных руд	245
1. Частотное электромагнитное зондирование	194	§ 57. Ядерно-геофизические методы	247
2. Зондирование становлением электромагнитного поля	196	1. Гамма-методы	248
§ 48. Индуктивные методы	197	2. Нейтронные методы	250
1. Наземные индуктивные методы	197	Глава VI. Сейсмическая разведка	254
2. Воздушные индуктивные методы	201	§ 58. Вопросы теории упругих волн и колебаний	254
§ 49. Радиоволновые методы	205	1. Продольные и поперечные волны	256
1. Метод радиокип	205	2. Основные характеристики упругих волн	258
2. Метод радиоволнового просвечивания	207	3. Спектральное разложение графика колебаний и профиля волны	261
Глава V. Радиометрические методы разведки	210	§ 59. Особенности распространения волн в упругой среде	263
§ 50. Физические основы радиометрических методов	210	1. Основные принципы геометрической сейсмологии	265
1. Строение ядер атомов и типы радиоактивного распада	210	2. Отражение и преломление волн	267
2. Естественные радиоактивные элементы и их превращения	213	3. Дифрагированные поверхностные, звуковые и другие волны, применяемые в сейсморазведке	270
3. Законы распада радиоактивных элементов	215	4. Годографы отраженных и преломленных волн	272

§ 60. Сейсморазведочная аппаратура	276	2. Комплексные автоматические каротажные станции с потенциометрической записью	352
1. Принцип работы аппаратуры	276	3. Аппаратура для регистрации скважинных сигналов в двоично-цифровом коде	353
2. Сейсмоприемники	280	4. Аппаратура комплексного электрического каротажа	354
3. Усилители	283	5. Аппаратура индукционного каротажа и скважинной индукционной электроразведки	359
4. Регистрирующие устройства	285	6. Спуско-подъемные устройства и оборудование	360
5. Сейсмические станции и установки с аналоговой записью	288	§ 68. Методика и техника проведения электрических исследований в скважинах	361
6. Сейсмические станции с цифровой магнитной записью	290	§ 69. Радиоактивные методы исследования скважин	365
§ 61. Методы сейсморазведки	294	1. Сущность радиоактивных методов каротажа	365
§ 62. Методика полевых работ	297	2. Аппаратура радиоактивного каротажа	368
1. Системы наблюдений в методе отраженных волн	298	3. Методика радиоактивного каротажа	370
2. Системы наблюдений в методе преломленных волн	302	§ 70. Другие виды каротажа	374
3. Условия приема и возбуждения упругих колебаний	305	1. Магнитный каротаж	374
§ 63. Организация и техника полевых работ	311	2. Акустический каротаж	379
§ 64. Обработка и интерпретация материалов сейсморазведки	315	3. Геохимические методы исследования скважин	382
1. Обработка сейсмограмм, корреляция волн, введение поправок и составление годографов	315	4. Гравитационный каротаж	390
2. Обработка материалов сейсмокаротажа	319	5. Термический каротаж	392
3. Определение эффективной и граничной скоростей по годографам отраженных и преломленных волн	320	§ 71. Различные операции в скважинах	396
4. Построение отражающих и преломляющих границ	322	1. Измерение искривления скважин	396
5. Построение сейсмических разрезов	323	2. Измерение диаметра скважин	400
6. Построение структурных карт и схем	324	3. Измерение наклона пластов	402
7. Обработка сейсмических материалов на аналоговых и цифровых вычислительных машинах	325	4. Отбор грунтов, перфорация и торпедирование скважин	403
§ 65. Применение сейсморазведки для решения различных геологических задач	328	§ 72. Геологическая интерпретация результатов геофизических исследований скважин	406
Г л а в а VII. Геофизические методы исследования скважин	332	1. Определение глубины залегания и мощности пластов	408
§ 66. Физические основы электрического каротажа скважин	333	2. Определение удельного сопротивления пластов	410
1. Каротаж кажущегося сопротивления (КС) и потенциала собственной поляризации (ПС)	333	3. Определение пористости и других параметров	411
2. Боковое каротажное зондирование	340	4. Интерпретация данных каротажа нефтяных и газовых скважин	413
3. Каротаж по методам скользящих контактов (МСК) и электродных потенциалов (МЭП)	343	5. Интерпретация данных каротажа скважин на угольных месторождениях	414
4. Боковой каротаж	344	6. Интерпретация данных каротажа скважин рудных месторождений	416
5. Индукционный каротаж	346	7. Построение профильных разрезов и структурных карт	418
6. Резистивиметрия	347	З а к л ю ч е н и е	420
7. Микроразондирование	348	Л и т е р а т у р а	423
§ 67. Аппаратура и оборудование для каротажа скважин	348		
1. Автоматические каротажные станции с фотозаписью	349		